

مدل جامع نیروگاه بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوسو برای مطالعه سیستم‌های توزیع دارای تولید پراکنده

سعید قاسم‌زاده	مریی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
سید حسین حسینی	استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
گئورگ قره‌پتیان	استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدل مشروح ژنراتور القایی با تغذیه دوسو، رفتار نیروگاه بادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌های الکترونیک قدرت نیروگاه و سیستم‌های کنترلی آن و رفتار نیروگاه شامل قسمت‌های الکتریکی و آئرودینامیکی شبیه‌سازی می‌شود. تغییرات سرعت باد و شرایط بهره‌برداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و عملکرد سیستم‌های کنترلی که با استفاده از کنترل برداری ماشین القایی طراحی شده‌اند، ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل می‌تواند به خوبی برای بررسی عملکرد متقابل سیستم‌های قدرت با تولید پراکنده که از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: نیروگاه بادی، تولید پراکنده، ژنراتور القایی.

Unified Modeling of Wind Power Station Including DFIG for Distributed Generation Studies

S. Ghassem Zadeh and S. H. Hosseini

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz,
Iran

G. B. Gharehpetian Electrical Engineering Department, Amirkabir University
of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Using a detailed model of wind power station, including wind turbine, wind turbine governor, wind resources and the DFIG, the performance of wind power station is investigated. It consists of wound rotor induction machine, grid side converter, rotor side converter and associated controllers. The control scheme uses stator flux oriented control for the rotor side converter and grid voltage vector control for the grid side converter. PSCAD/EMTDC is used for simulation. The main power electronic circuits and controllers are also developed in details and in the same simulation tool. The simulation model is also used to investigate the performance of controllers under different network conditions. The responses of rotor speed, active power output and blade pitch angle are obtained for various conditions of power grid. While this study shows the performance of a wind power station in variable wind and power grid conditions, it is an essential and preliminary part of investigating the integrating issues of renewable distributed generation with power grid.

Key words: Wind power station, Distributed generation, Double fed induction generator.

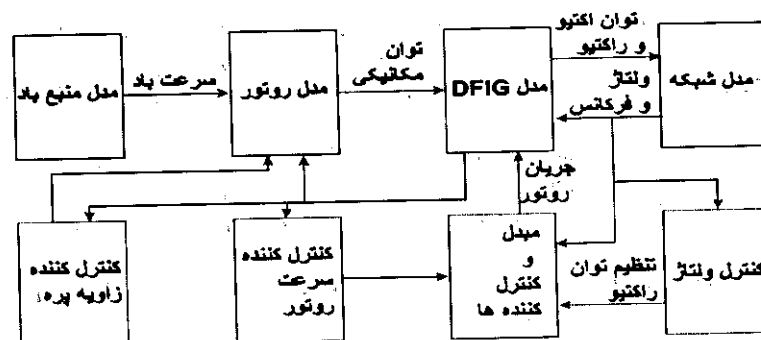
۱- مقدمه

شکل کنونی سیستم‌های قدرت با ظهور مجدد نیروگاه‌های کوچک و متوسط پراکنده که به شبکه‌های توزیع و فوق توزیع متصل هستند، در حال دگرگونی است. گرچه دلایل پیدایش این نیروگاه‌ها در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه یکسان نیست ولی تاثیر کم‌وبیش یکسانی بر شبکه‌های برق‌رسانی دارند. نیروگاه‌های پراکنده در شرایط بهره‌برداری کنترل شده می‌توانند اثر مطلوبی بر مشخصه بار، افت ولتاژ شبکه و تلفات خطوط توزیع داشته باشند [۱ و ۲]. از سوی دیگر در آنها اغلب از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شود که با وجود تامین بخشی از تقاضای انرژی برق، به دلیل متعدد بودن و متنوع بودن فن‌آوری‌های به کار گرفته شده در تولید انرژی برق، بهره‌برداری از آنها را مشکل می‌سازد [۴ و ۵]. در نیروگاه‌های پراکنده‌ای که از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، مبدل‌های الکترونیک قدرت به بخش جدایی ناپذیری تبدیل شده است. این امر گرچه متصل ساختن آنها را به شبکه قدرت امکانپذیر می‌کند ولی رفتار دینامیکی و تحلیل آن‌ها را پیچیده‌تر می‌سازد [۶ و ۷]. در مطالعات سیستم‌های قدرت، تولید پراکنده اغلب به شکل بار منفی در نظر گرفته می‌شود که بر خلاف نیروگاه‌های مرسوم در پشتیبانی ولتاژ و فرکانس شبکه شرکت نمی‌کنند [۸]. بنابراین به نظر می‌رسد طبیعت متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر و تنوع فن‌آوری موجود، مطالعات سیستم قدرت در این عرصه را به نوع تولید نیروگاه پراکنده وابسته ساخته است. انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی امواج، انرژی پتانسیل آب، انرژی‌های تجدیدپذیری هستند که می‌توان از آن‌ها در نیروگاه‌های پراکنده استفاده کرد ولی روش‌های کنترل، بهره‌برداری و شیوه اتصال به شبکه قدرت در آنها بسیار متفاوت است. بنابراین در تحلیل عملکرد متقابل سیستم‌های قدرت و نیروگاه‌های پراکنده هر چند که هدف اصلی، مطالعه مقوله تولید پراکنده و سیستم قدرت

می‌باشد، استفاده از مدل مشروح سیستم تولید ضرورت دارد. در این مقاله به منظور بررسی عملکرد متقابل نیروگاه‌های پراکنده و سیستم قدرت، یک نیروگاه بادی سرعت متغیر متصل به سیستم قدرت مطالعه می‌شود. در مدل‌سازی اجزاء این نیروگاه به میزان تاثیر و ارتباط آنها به سیستم قدرت توجه بیشتری شده است. در این مطالعه تاثیر متغیرها و پارامترهای کنترلی بر عملکرد تولید پراکنده و ارتباط آن با سیستم قدرت قابل بررسی است. برای تحقق بخشیدن به این مدل‌ها و شبیه‌سازی عملکرد آنها نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- نیروگاه بادی

نیروگاه‌های بادی در منابع متعدد مورد مطالعه قرار گرفته و دانش فنی کافی در جنبه‌های مختلف آن از مهار انرژی باد تا تولید انرژی برق و کنترل آن کسب شده است [۹، ۱۰ و ۱۱]. مدل نیروگاه بادی معمولاً از منبع باد، آنوردینامیک توربین، محور توربین و جعبه دنده، ژنراتور، الکترونیک قدرت، اجزاء کنترلی، رله‌های حفاظتی و شبکه تشکیل می‌شود. در قسمت مکانیکی این مطالعه شامل منبع باد، توربین بادی، گاورنر و جعبه دنده و نیز ماشین القایی روتور سیم پیچی شده از مدل‌های موجود در نرم افزار PSCAD استفاده شده است [۱۲]. در مدل منبع باد، پارامترهای سرعت میانگین و شیب افزایشی-کاهشی سرعت باد، اغتشاش باد و تندباد در نظر گرفته شده است. توربین مورد استفاده از نوع محور افقی، سه پره با کنترل زاویه گام پره است. گاورنر با سنجش توان خروجی ژنراتور، زاویه گام پره را برای کسب انرژی مناسب برای دستیابی به توان خروجی مورد انتظار تغییر می‌دهد. ساختار نیروگاه بادی سرعت متغیر در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۱- دیاگرام نیروگاه بادی سرعت متغیر

۴- مبدل طرف شبکه

مبدل طرف شبکه با فرکانس شبکه کار می‌کند. هدف کنترل این مبدل ثابت نگاه داشتن ولتاژ DC اتصال میانی است. این امر بایستی مستقل از جهت و میزان توان عبوری از مبدل دو سویه باشد. کنترل برداری با در نظر گرفتن قاب مرجع هم راستا با ولتاژ استاتور صورت می‌گیرد. با این ترتیب کنترل تفکیک شده توان اکتیو و راکتیو بین شبکه و مبدل طرف شبکه امکان‌پذیر می‌شود. این کنترل از طریق مولفه‌های d و q جریان‌ها انجام می‌شود.

۵- مبدل طرف روتور

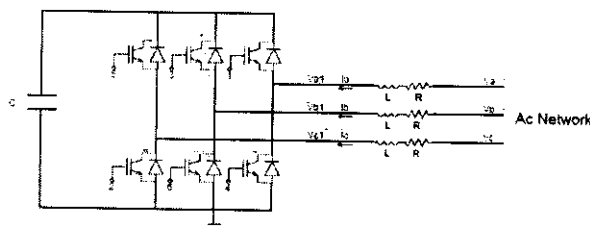
فرکانس مبدل طرف روتور با سرعت توربین تغییر می‌کند. هدف کنترل مبدل طرف روتور، کنترل گشتاور الکتریکی و جریان تحریک روتور است. کنترل برداری با در نظر گرفتن قاب مرجع هم‌راستا با بردار فلوی استاتور انجام می‌شود. جریان تحریک روتور با مولفه d جریان کنترل می‌شود. اگر جریان تحریک ماشین توسط استاتور تامین شود، این جریان صفر در نظر گرفته می‌شود.

۶- سیستم کنترل

در این مقاله بر اساس تحلیل صورت گرفته در [۱۵] سیستم‌های کنترلی مورد نیاز در محیط PSCAD/EMTDC اجرا شده است. با اندازگیری ولتاژ و جریان‌های استاتور، جریان‌های مبدل طرف شبکه و روتور و با استفاده از سیستم‌های کنترلی زوایای آتش IGBT به دست می‌آیند. با تعیین سیگنال‌های مرجع می‌توان عملکرد نیروگاه بادی را برای رسیدن به هدف‌های بهره‌برداری معین کنترل کرد.

۶-۱- کنترل مبدل طرف شبکه

در شکل (۳) مبدل طرف شبکه با ولتاژ و جریان‌های فاز نشان داده شده است.

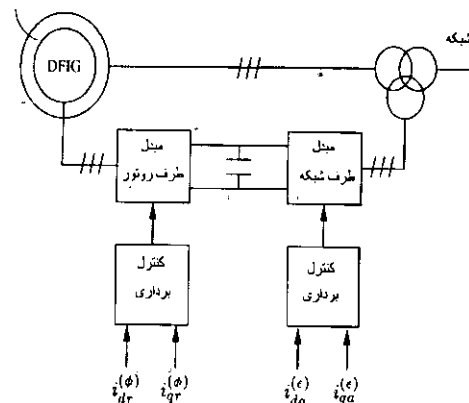


شکل ۳- شبکه AC متصل به یک مبدل

مدل سایر قسمت‌های الکتریکی شامل مبدل‌های الکترونیک قدرت و مدارهای کنترل کننده نیز در نرم افزار PSCAD اجرا شده است. نتایج این شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های بلوک‌های این ساختار به دست آمده است.

۳- ژنراتور

ژنراتور مورد استفاده در این مقاله از نوع القایی روتور سیم پیچی شده با تغذیه دوگانه است. این نوع ژنراتور در حال حاضر به عنوان یک مولد سرعت متغیر برای استفاده در نیروگاه‌های بادی مورد توجه بیشتری قرار دارد [۱۴]. این ماشین در منابع متعدد به طور کامل مورد تحلیل قرار گرفته است و دانش فنی کافی برای مدل‌سازی آن به عنوان یک منبع تولید پراکنده در سیستم قدرت موجود است [۶، ۷، ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. ویژگی DFIG تولید توان با فرکانس ثابت در سرعت متغیر روتور است، امری که در بهره‌برداری از انرژی باد بسیار اهمیت دارد. این کار با کنترل جریان تزریقی به روتور انجام می‌شود. همچنین امکان بازیافت توان روتور در سرعت‌های بالای سرعت سنکرون و تزریق آن به شبکه نیز در این ژنراتور وجود دارد. جهت توان در مسیر سیم‌پیچی روتور دو طرفه و در مسیر سیم پیچی استاتور به طرف شبکه است. برای دستیابی به شرایط فوق از یک مبدل دو سویه PWM در مدار سیم پیچی روتور استفاده می‌شود. در حالی که سیم پیچی استاتور به طور مستقیم به شبکه متصل شده است، سیم پیچی روتور از طریق یک مبدل AC/DC و یک اتصال خازن میانی و یک مبدل DC/AC به شبکه متصل شده و کنترل می‌شود. توان مبدل به کار گرفته شده کسری از توان کل ماشین است که خود یک مزیت به شمار می‌رود. دیاگرام این ژنراتور در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- دیاگرام ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه

برای ولتاژ و جریان‌های فوق می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} val \\ vbl \\ vcl \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن L و R اندوکتانس و مقاومت مدار هستند. با استفاده از تبدیل Park (ضمیمه ۱) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{d1} \\ v_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + v_{q1} \end{aligned} \quad (2)$$

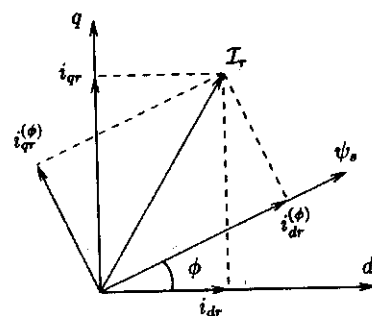
توان اکتیو و راکتیو نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} P &= 3(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q &= 3(v_d i_q - v_q i_d) \end{aligned} \quad (3)$$

زاویه ولتاژ منبع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \tan^{-1} \frac{v_q}{v_d} \quad (4)$$

که در آن v_d و v_q مولفه‌های دو محوری ایستای ولتاژ استاتور هستند. با استفاده از روابط فوق و به دست آوردن ولتاژهای مرجع می‌توان به راحتی و با استفاده از SIN-PWM زوایای آتش IGBT‌های به کار رفته در این مبدل را به دست آورد. دیاگرام کنترل برداری در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- دیاگرام کنترل برداری مبدل طرف استاتور

۶-۲- مبدل طرف روتور

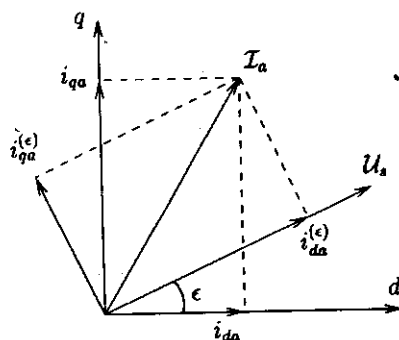
در این مبدل با توجه به رابطه ولتاژ و شار استاتور می‌توان نوشت:

$$v_{sa} - R_s i_{sa} = d \frac{\lambda_{sa}}{dt} \quad (5)$$

پس می‌توان با اندازه‌گیری ولتاژها و با استفاده از تبدیل Clarke (ضمیمه ۲)، موقعیت بردار شار را تعیین کرد:

$$\begin{aligned} \lambda_{\alpha s} &= \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \lambda_{\beta s} &= \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \\ \theta_s &= \tan^{-1} \frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \end{aligned} \quad (6)$$

سیس با استفاده از جریان‌های محوره‌های d و q مرجع و داشتن موقعیت شار با استفاده تبدیل لازم جریان‌های مرجع روتور را به دست آورد. بدین ترتیب زوایای آتش IGBT‌های مبدل طرف روتور با استفاده از PWM کنترل شده با جریان به دست خواهد آمد. دیاگرام کنترل برداری در شکل (۵) ارائه شده است.

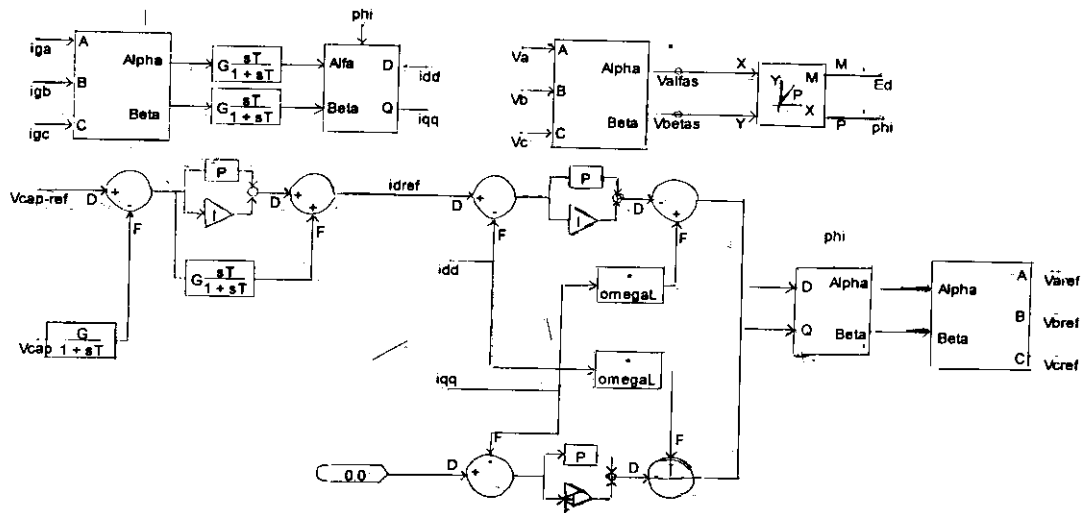


شکل ۵- دیاگرام کنترل برداری مبدل طرف روتور

۷- شبیه‌سازی

۷-۱- کنترل کننده مبدل طرف شبکه

بلوک دیاگرام اصلی سیستم کنترل این مبدل در شکل (۶) نشان داده شده است.

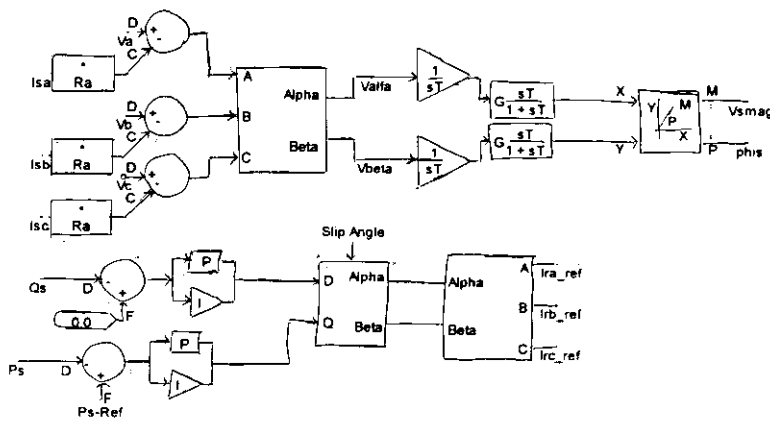


شکل ۶- بلوک دیاگرام اصلی کنترل مبدل طرف شبکه

۲-۷ کنترل کننده مبدل طرف روتور

بلوک دیاگرام اصلی سیستم کنترل این مبدل در شکل (۷) نشان داده شده است. با استفاده از این سیستم کنترل، جریان‌های مرجعی به دست می‌آیند که با استفاده از آنها فرمان‌های آتش IGBT‌های مبدل طرف روتور تهیه می‌شود. هدف این کنترل کننده ثابت نگه داشتن فرکانس خروجی ژنراتور از طریق جریان روتوری با فرکانس متغیر است. در این مبدل کنترل توان راکتیو از طریق Idref روتور و تغییر توان اکتیو از طریق Iqref امکان‌پذیر است. چگونگی این تغییرات در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

با استفاده از این سیستم کنترل، ولتاژهای مرجعی به دست می‌آیند که با استفاده از آنها فرمان‌های آتش IGBT‌های مبدل طرف شبکه تهیه می‌شود. هدف این کنترل کننده ثابت نگاه داشتن ولتاژ DC خازن میانی است. در شکل‌های (د-۹) الی (د-۱۲) از مجموعه شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی نیروگاه بادی، ولتاژ خازن میانی نشان داده شده است که صرف‌نظر از شرایط کاری نیروگاه بادی و جهت جریان توان در مبدل همواره توسط این کنترل کننده ثابت نگاه داشته شده است. با استفاده از این مبدل کنترل تفکیک شده توان اکتیو و راکتیو در این مبدل حاصل می‌شود. این امر از طریق کنترل Idref برای توان اکتیو و Iqref برای توان راکتیو صورت می‌گیرد، شکل (۱۳).



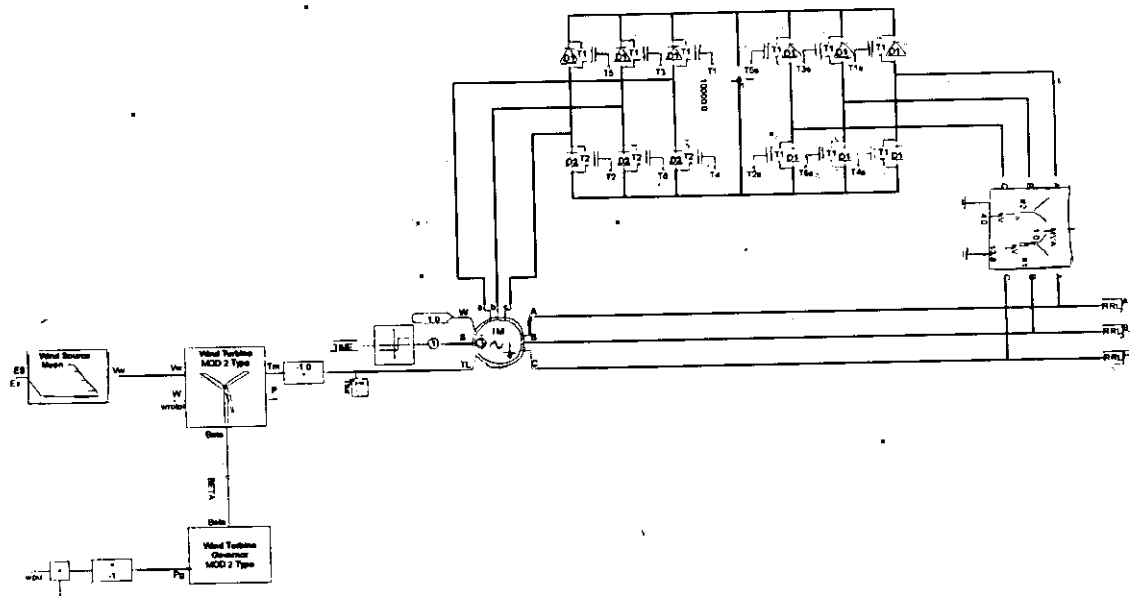
شکل ۷- بلوک دیاگرام اصلی کنترل مبدل طرف روتور

۳-۷ نیروگاه بادی

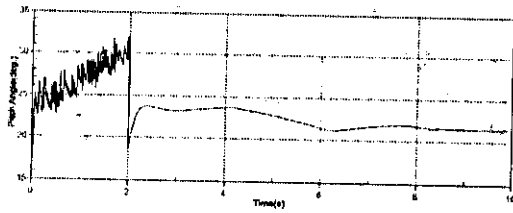
در شکل (۸) یک نیروگاه بادی متصل به سیستم قدرت نشان داده شده است. هدف بررسی عملکرد سیستم‌های کنترلی مکانیکی و الکتریکی و پاسخ آنها به شرایط بهره‌برداری است. برای نشان دادن پاسخ سیستم‌های آنرودینامیکی و الکتریکی زمان شبیه‌سازی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این شبیه‌سازی بررسی عملکرد نیروگاه بادی در شرایط بهره‌برداری و دینامیک بلند مدت نیروگاه است که از ثانیه دوم شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای سهولت بررسی فقط منحنی تغییرات زاویه گام پره توربین، جریان روتور، توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ خازن میانی نشان داده شده است. در هر مورد برای راحتی مقایسه، جریان روتور در بازه زمانی کوتاه‌تری نیز نشان داده شده است.

در شکل (۹) رفتار نیروگاه در سرعت باد ثابت و تقاضای توان ثابت بررسی شده است. سیستم بعد از ۲ ثانیه در حالت پایدار قرار می‌گیرد. زاویه پره توربین به تدریج در زاویه ۲۲ درجه با

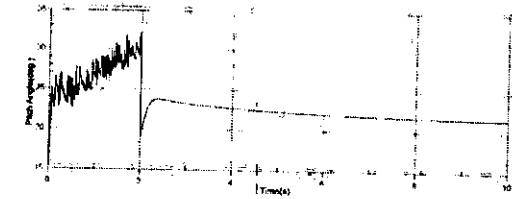
دامنه و فرکانس جریان روتور ثابت قرار می‌گیرد. نیروگاه در توان اکتیو نامی و ضریب توان واحد بهره‌برداری می‌شود. ولتاژ خازن میانی نیز ثابت است. در شکل (۱۰) رفتار نیروگاه در مقابل تغییرات کند سرعت باد نشان داده شده است. با تغییر سرعت باد، گاورنر توربین بادی زاویه پره توربین را برای دریافت توان اکتیو مورد نظر تغییر می‌دهد. علاوه بر تغییر زاویه توربین در سیستم مکانیکی، فرکانس جریان روتور در سیستم الکتریکی نیز تغییر می‌کند تا توان اکتیو خروجی و فرکانس سیستم ثابت باقی بماند. در طی این تغییرات ولتاژ خازن میانی همچنان ثابت می‌ماند که نشان دهنده صحت عملکرد سیستم کنترلی مبدل است. در طی این مدت سیستم همچنان با ضریب توان واحد بهره‌برداری می‌شود. میزان تغییرات توان اکتیو در اثر تغییرات باد نیز در شکل مشاهده می‌شود. در شکل (۱۱) رفتار نیروگاه بادی در برابر تغییرات تقاضای توان در حالی که سرعت باد ثابت فرض شده است نشان داده شده است. شکل (۱۲) رفتار نیروگاه در سرعت و توان متغیر را نشان می‌دهد.



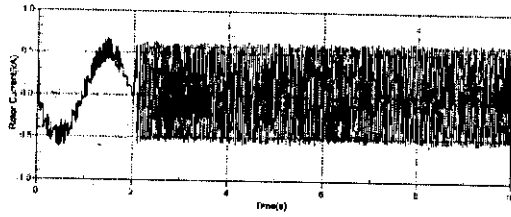
شکل ۸- DFIG، مبدل ac/dc/ac، توربین بادی و گاورنر



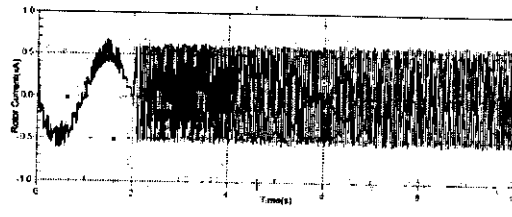
(الف) زاویه پره توربین



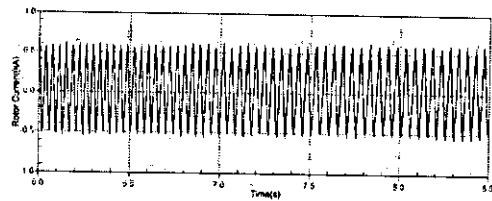
(الف) زاویه پره توربین



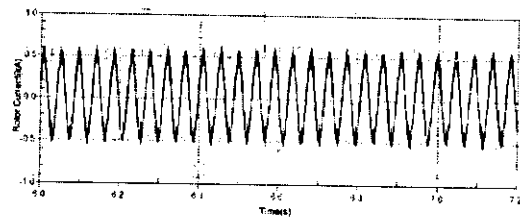
(ب) جریان روتور



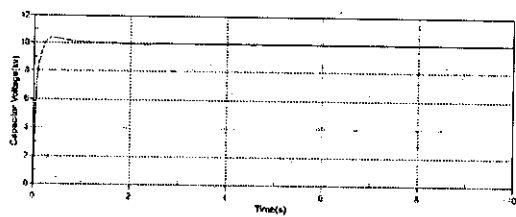
(ب) جریان روتور



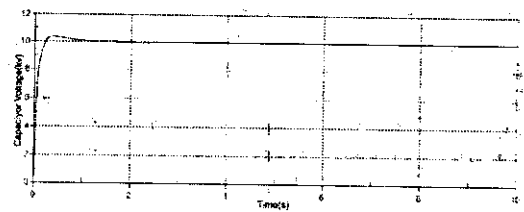
(ج) جریان روتور



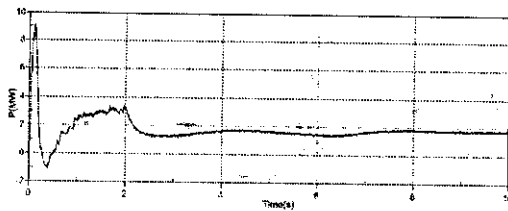
(ج) جریان روتور



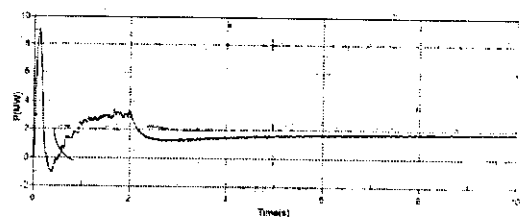
(د) ولتاژ خازن میانی



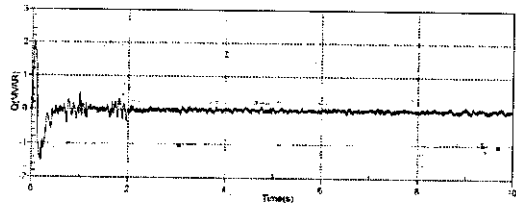
(د) ولتاژ خازن میانی



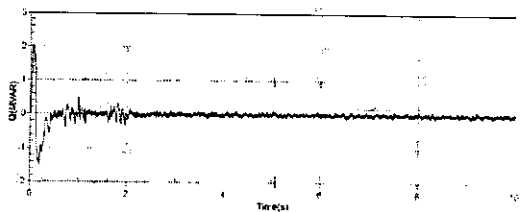
(ه) توان اکتیو



(ه) توان اکتیو



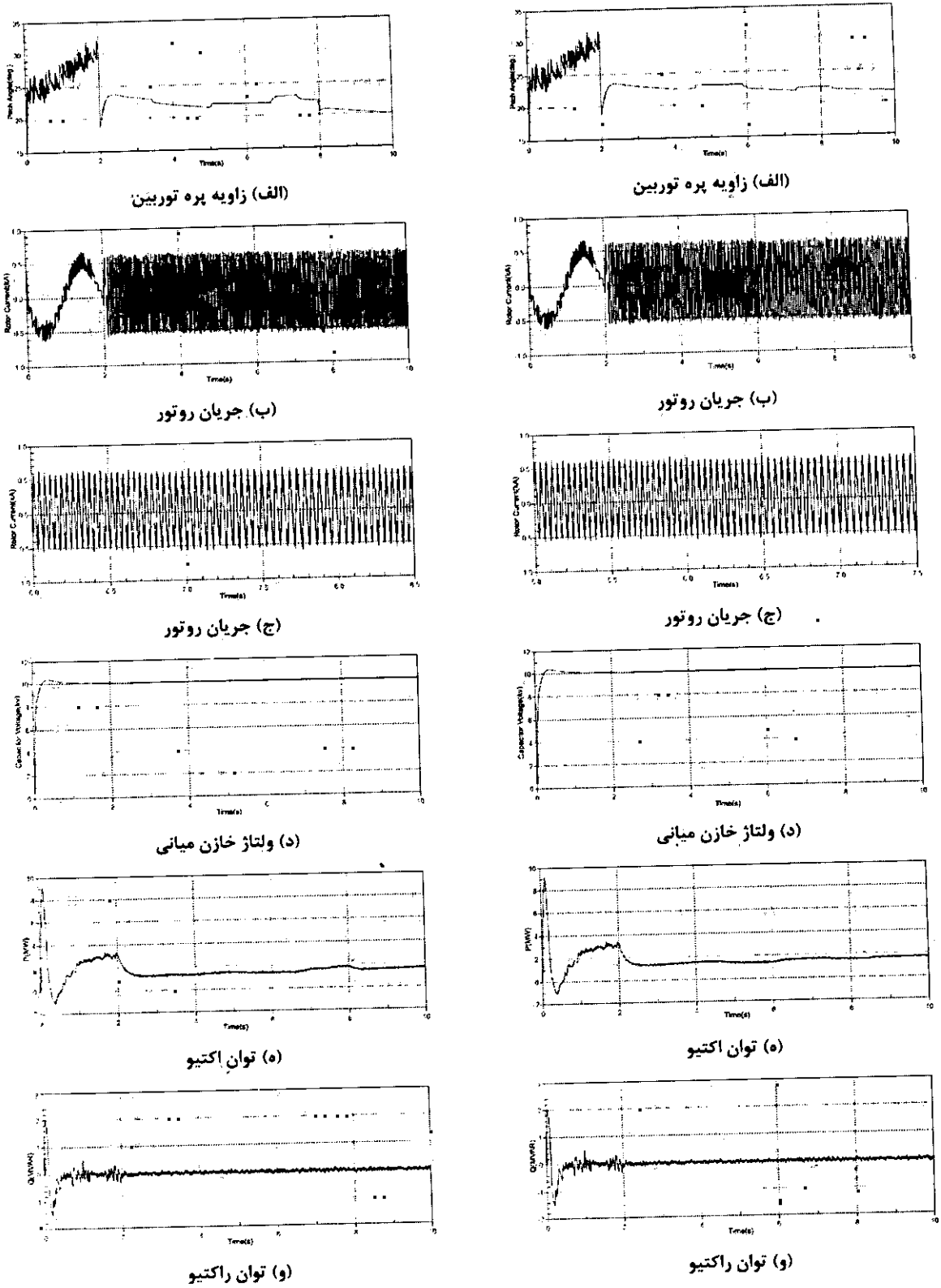
(و) توان راکتیو



(و) توان راکتیو

شکل ۱۰- عملکرد نیروگاه بادی در سرعت متغیر باد

شکل ۹- عملکرد نیروگاه بادی در سرعت ثابت باد



شکل ۱۲- عملکرد نیروگاه بادی در برابر تغییر توان اکتیو در سرعت باد متغیر

شکل ۱۱- عملکرد نیروگاه بادی در برابر تغییر توان اکتیو در سرعت باد ثابت

گذرای سیستم قدرت می‌باشد. از سوی دیگر با استفاده از پارامترهای کنترلی، انتخاب مناسب سیگنال‌های مرجع، طراحی کنترل‌کننده‌های خاص و تعبیه آنها در سیستم کنترلی موجود، نیروگاه را برای حصول اهداف معینی در سیستم قدرت بهره‌برداری نمود.

ضمیمه

۱- تبدیل Park

در تحلیل ماشین‌های الکتریکی، معمولاً لازم است یک قاب مرجع واحد برای استاتور و روتور در نظر گرفته شود. این کار با تبدیل Park انجام می‌شود که در آن:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

از این تبدیل می‌توان جریان‌های محور d و q را به دست آورد.

۲- تبدیل Clarke

اگر جریان‌های استاتور یک ماشین سه فاز به شکل زیر در نظر گرفته شود:

$$i_{sA}(t) + i_{sB}(t) + i_{sC}(t) = 0$$

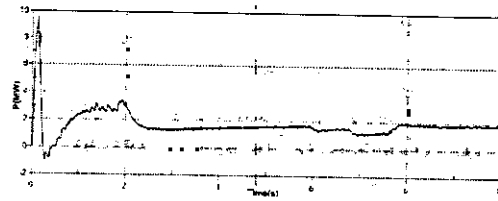
می‌توان تبدیل زیر را در نظر گرفت:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\gamma) & \cos(2\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA}(t) \\ i_{sB}(t) \\ i_{sC}(t) \end{bmatrix}$$

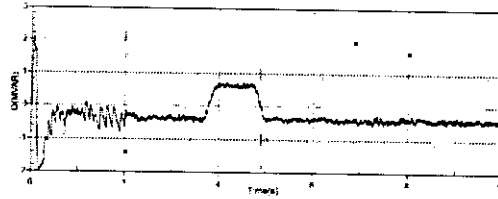
که در آن $\gamma = 2\pi/3$ ضریب تبدیل تا حدودی اختیاری است، در اینجا برای ثابت ماندن دامنه‌ها، ضریب $K = 2/3$ در نظر گرفته شده است. این تبدیل برای ولتاژ و شار نیز صدق می‌کند. از روی ماتریس فوق تبدیل معکوس به راحتی به دست می‌آید.

مراجع

[1] M. W. Davis, "Distributed resource electric power systems offer significant advantages over



(الف) توان اکتیو



(ب) توان راکتیو

شکل ۱۳- کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله دینامیک بلندمدت یک نیروگاه بادی سرعت متغیر با استفاده از مدل مشروح اجزاء آن مورد بررسی قرار گرفت. این نیروگاه می‌تواند به عنوان یک تولید پراکنده به سیستم قدرت متصل شود. کنترل تفکیک شده توان اکتیو و راکتیو و نیز عملکرد آن با ضریب توان واحد از ویژگی‌های این نیروگاه است. مدل حاضر می‌تواند برای مطالعه تغییرات سرعت باد و نیز تغییرات دینامیکی توان مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این مدل مشروح می‌توان اصلی‌ترین مشکلات ناشی از این نیروگاه‌ها را شامل کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس، کیفیت توان و نیز رفتار آن را در شرایط اتصال کوتاه متقارن مورد بررسی قرار داد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با وجود یکسان نبودن سرعت پاسخ کنترل‌های الکتریکی و اترودینامیکی، هر دو سیستم‌های کنترلی عملکرد مناسبی را ارائه می‌دهند. این مدل همچنین می‌تواند در مجموعه‌ای از نیروگاه‌های بادی نیز مورد استفاده قرار گیرد. در این صورت می‌توان نحوه استفاده از تولید پراکنده برای پشتیبانی و شرکت آن در پخش بار شبکه را نیز مورد مطالعه قرار داد. با افزایش تولید پراکنده در سیستم قدرت، به ویژه نیروگاه‌های بادی این نکته بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند. شرکت نیروگاه در تامین و کنترل توان راکتیو و پشتیبانی از شبکه در شرایط اضطراری نیز با استفاده از این مدل قابل مطالعه است. مدل ارائه شده قابل توسعه به مطالعات اضطراری سیستم قدرت و بررسی عملکرد متقابل در شرایط

- to variable speed wind energy generation", IEE Proc. Electrical Power Applications, vol. 143, no. 3, May 1996.
- [16] R. J. Koessler, S. Pillutla, L. H. Trinh and D. L. Dickmader, "Integration of large wind farms into utility grids pt. I - Modeling of DFIG", Power Engineering Society General Meeting, vol. 3, pp. 1519, Jul. 2003.
- central station generation and T&D power systems. I", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, vol. 1, pp. 54-61, Jul. 2002.
- [2] M. W. Davis, "Distributed resource electric power systems offer significant advantages over central station generation and T&D power systems II", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, vol. 1, pp. 62-69, Jul. 2002.
- [3] P. Chiradeja, "Benefits of distributed generation, A line loss reduction analysis", 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, China
- [4] R. Ramakumar and P. Chiradeja, "Distributed Generation and Renewable Energy Systems", 37th Intersociety Energy Conversion Conference 2002.
- [5] R. Lawrence and S. Middlekauff, "The New Guy on the Block", IEEE Industry Application magazine, Jan 2005.
- [6] F. Blaabjerg and S. B. Zhe Chen Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, Issue: 5, pp. 1184-1194, Sep. 2004.
- [7] J. M. Carrasco, et al, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", IEEE Transactions on industrial Electronics, vol. 53, Issue 4, pp. 1002-106, Jun. 2006.
- [8] N. Jenkins, "Embedded generation", London, IEE, 2000.
- [9] J. F. Manwell, et al, "Wind Energy Explained", John Wiley & Sons, England, 2002.
- [10] T. Burton, et al, "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, England, 2001.
- [11] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, England, 2005.
- [12] PSCAD® Version, 4.2 Users Manual, Manitoba HVDC Research Centre, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2006.
- [13] J. G. Slootweg, "Wind power, Modeling and impact on power system dynamics", PhD. thesis, University of Delf, Netherlands, 2003.
- [14] L. H. Hansen, et al, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.
- [15] R. Pena, J. C. Clare and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back to back PWM converters and its application