

کنترل و توزیع توان راکتیو بین ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه در یک نیروگاه بادی به روش فازی-عصبی

ابوالفضل حلوائی نیاسر، احد کاظمی و محسن کلانتر

چکیده: مدل سازی و شبیه سازی تولید توان در یک نیروگاه بادی، یک ابزار اساسی برای مکان یابی و ایجاد نیروگاه های جدید است. در این مقاله مساله کنترل و توزیع توان راکتیو در نیروگاه بادی بین ژنراتورهای القایی با تغذیه از دو طرف روتور و استاتور، بررسی شده است. پس از مروری مختصر بر مدل یک توربین بادی، مدل دینامیکی یک ماشین القایی در دستگاه مختصات منطبق بر شار استاتور استخراج و شبیه سازی گردیده است. بمنظور کنترل مقاوم توان راکتیو ژنراتور القایی و مستقل از توان اکتیو آن از کنترل کننده فازی-عصبی تطبیقی استفاده شده است. پس از آزمایش صحت مدل دینامیکی ماشین، مساله کنترل توان راکتیو یک نیروگاه بادی و توزیع توان راکتیو بین ژنراتورهای آن، که برحسب سرعت باد در نقاط کاری مختلف از منظر مقدار توان اکتیو تولید شده قرار دارند، بررسی گردیده و نهایتاً از کنترل کننده فازی-عصبی مذکور، برای این منظور استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان از قابلیت بالای کنترل کننده فازی-عصبی چه در کنترل درایو و چه بمنظور کنترل و توزیع توان راکتیو کل نیروگاه بادی دارند.

واژه های کلیدی: کنترل توان راکتیو، کنترل کننده فازی-عصبی، ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه، نیروگاه بادی

۱. مقدمه

تا دهه اخیر، اتصال تولید کنندگان متفرقه توان الکتریکی به شبکه های برق، برای کاربردهای محلی و جزئی، مشکل خاصی به همراه نداشته است. دلیل آن، مقدار کم توان تولید شده توسط این تولیدکنندگان بوده است که کسر کوچکی از کل توان شبکه می باشد. با این وجود در سالیان اخیر، شرایط تغییر نموده است و بخصوص انرژی باد به یکی از مهم ترین و خوش آتیه ترین منابع انرژی های نو، بدل شده است. توان بادی نصب شده در کشورهای مختلف، طی سالیان اخیر بطور چشمگیری افزایش یافته است و استفاده از انرژی باد بعنوان یکی از جدیدترین و مهم ترین منابع

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۷/۲۳ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۱۸ به تصویب نهایی رسیده است.

ابوالفضل حلوائی نیاسر، دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، halvai@iust.ac.ir

دکتر احد کاظمی، دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری سیستم های قدرت، kazemi@iust.ac.ir

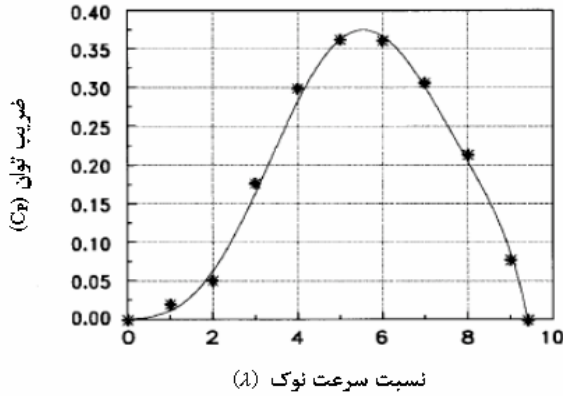
دکتر محسن کلانتر، دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری سیستم های قدرت، kalantar@iust.ac.ir

تولید توان الکتریکی در بسیاری نقاط مورد توجه فراوان قرار گرفته است. امروزه تعداد زیادی نیروگاه های بادی در حال بهره برداری و یا ساخت می باشند که بدست آوردن یک مدل مناسب برای آنها، چه به منظور بهره برداری و بررسی اثرات متقابل شبکه و نیروگاه بادی بر یکدیگر و چه در نظر گرفتن جنبه های طراحی، از اهمیتی خاص برخوردار می باشد. دقت مدل بکار رفته سبب افزایش قابلیت اطمینان نتایج شبیه سازی خواهد بود [1, 2, 3].

یکی از مشکلاتی که بطور معمول در ارتباط با توان گرفته شده از باد مطرح می گردد، کنترل توان راکتیو تولید شده یا مصرف شده در نیروگاه های بادی می باشد. با در نظر گرفتن مشکلات فنی ناشی از تغییر سرعت باد و اثر آن بر سیستم قدرت، لازم است درباره نوع ژنراتوری که باید در کنترل متغیرهای الکتریکی شبکه و یا بطور خاص کنترل توان راکتیو بکار می رود، بحث گردد. علاوه بر خواص ذاتی ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه (DFIG)، مطالعات انجام شده و نتایج عملی ثابت نموده اند که این ژنراتورها قادر هستند حداکثر توان حقیقی را متناظر با سرعت باد موجود، تولید نمایند [4].

با بکار بردن روش های کنترلی مناسب، توان راکتیو می تواند مستقل از توان اکتیو ژنراتور و با در نظر گرفتن محدودیت های

از سرعت باد و سرعت زاویه ای محور توربین می باشد. شکل ۱ مثالی از تغییرات ضریب توان $C_p(\lambda)$ برحسب λ را برحسب یک مقدار سرعت باد مشخص، برای یک توربین بادی نمونه نمایش می دهد.



شکل ۱. تغییرات ضریب توان یک توربین بادی

در این منحنی مقدار حداکثر توان، در $\lambda = 5$ اتفاق می افتد. در سرعت های متفاوت باد این منحنی جابجا شده و لذا نقطه حداکثر توان جابجا می گردد که این نقطه باید شناسایی شود. برای کسب حداکثر توان اکتیو در سرعت های مختلف باد، نیاز به داشتن یک سیستم کنترل حلقه بسته می باشد که با استفاده از ژنراتور القایی و روش کنترل برداری قابل انجام است [1, 4].

۳. مدل دینامیکی ژنراتور DFIG

شکل ۲ شمایی از یک ماشین القایی تغذیه شونده از دو طرف استاتور و روتور را نمایش می دهد. در حالت عادی، استاتور مستقیماً به شبکه برق متصل شده و روتور نیز از طریق یک مبدل توان فرکانس متغیر، به شبکه متصل می باشد. بمنظور پوشش دادن منطقه وسیعی از عملکرد شامل سرعت های زیر سنکرون تا فوق سنکرون، مبدل توان بکار رفته در مدار روتور باید قابلیت عبور توان در هر دو جهت را داشته باشد. عملکرد ماشین القایی DFIM می تواند با استفاده از تئوری کلاسیک میدان های دوار و بکار بردن تبدیل های ۲ محوری به ۳ محوری و بالعکس تحلیل شود [5]. در شکل ۳ دستگاه های مختصات دو محوری ایستای DQ واقع بر استاتور، دوار $\alpha\beta$ واقع بر محور روتور و دستگاه دوار $x\gamma$ واقع بر شار میدان استاتور نمایش داده شده اند.

برای سادگی تحلیل و dc شدن مقادیر متغیر با زمان جریان ها و ولتاژهای سینوسی استاتور و روتور، معادلات دیفرانسیل ماشین DFIM به دستگاه مختصات $x\gamma$ منتقل می شوند [2, 5].

مربوط به ظرفیت حرارتی ماشین، کنترل گردد. روش کنترل برداری سبب کنترل مستقل از هم توان های راکتیو و اکتیو ماشین می شود [5,6]. روش های کنترل غیرخطی و بهینه نیز در کنترل ضریب توان ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه بکار برده شده اند [7]. اغلب این روش ها نیازمند مدل دقیق ژنراتور نیروگاه بادی می باشند. علاوه بر آن در بحث کنترل ضریب توان کل نیروگاه بادی، تغییر سرعت باد بر رفتار کنترل کننده ضریب توان تاثیر نامناسب دارد [6, 8]. لذا در این مقاله از یک کنترل کننده فازی-عصبی تطبیقی و مقاوم برای این منظور استفاده می گردد.

استفاده از کنترل کننده های هوشمند در کنترل سیستم های قدرت مورد توجه فراوان می باشد. از دلایل آن می توان به مقاومت، تطبیقی بودن و غیر مبتنی بر مدل بودن طراحی این کنترل کننده ها اشاره نمود. با کنترل فازی، اطلاعات فرد خبره می تواند بمنظور کنترل سیستم بکار رود [9]. شبکه های عصبی نیز قابلیت پردازش موازی بالایی داشته و در یادگیری و تخمین نامعینی های سیستم و کنترل سیستم های غیرخطی کاربرد فراوان دارد [10]. ترکیب سیستم های فازی با شبکه های عصبی سبب ایجاد ساختاری با خواص دوگانه می گردد که قابلیت بسیار بالایی دارد [11]. در این مقاله شکلی نو از شبکه های فازی - عصبی ارائه می گردد که در آن از یادگیری تقویت برای آموزش شبکه عصبی استفاده می شود و ساختار کنترل کننده ارائه شده در مقایسه با سایر شبکه های عصبی و فازی - عصبی، بسیار ساده تر و کم حجم تر می باشد.

در ادامه مقاله، ابتدا پس از بیان نحوه تولید انرژی توسط توربین بادی، به استخراج مدل کامل یک ژنراتور DFIG و شبیه سازی آن در محیط نرم افزاری Matlab/Simulink پرداخته می شود. در ادامه ساختار یک کنترل کننده هوشمند فازی - عصبی تطبیقی بر مبنای یادگیری تقویتی بیان می گردد که از آن در کنترل توان راکتیو یک ژنراتور DFIG استفاده می شود. در نهایت مدل یک نیروگاه بادی شامل چهار ژنراتور DFIG بررسی و از کنترل کننده فازی - عصبی ارائه شده برای کنترل ضریب توان کل نیروگاه بادی، استفاده می شود.

۲. مدل توربین بادی

مدل های مختلفی برای بیان چگونگی تولید توان کسب شده از باد برای یک توربین بادی ارائه گردیده است. مدلی که در این مقاله به آن اشاره می گردد، مدلی ساده ولیکن موثر می باشد. توان مکانیکی کسب شده از باد (P_{mech}) از رابطه

$$P_{mech} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

تبعیت می نماید که در آن، ρ و R به ترتیب چگالی هوا و شعاع توربین بوده و λ و v نیز نسبت سرعت نوک و سرعت خطی باد می باشند [2]. در رابطه (۱)، $C_p(\lambda)$ ثابت توان بوده و تابعی غیرخطی

این مقدار در صورت ثابت ماندن سرعت باد، بدون تغییر باقی می ماند. به ازای ضریب توان مرجع اعمالی به سیستم کنترل و با در نظر گرفتن محدودیت های ظرفیت گرمایی ماشین، مقدار توان راکتیو مرجع سیستم کنترل نیز تعیین می شود [2, 6]. مقادیر مرجع توان اکتیو و توان راکتیو همواره باید در رابطه زیر صدق نمایند [3, 8]:

$$P_{ref}^2 + \left(Q_{ref} - \frac{3}{2} |u_s| \frac{L_m}{L_s} \frac{|u_s|}{\omega_r L_m} \right)^2 = \left(\frac{3}{2} |u_s| \frac{L_m}{L_s} \right)^2 (i_{rMAX}^2) \quad (5)$$

در رابطه ۵، i_{rMAX} حداکثر جریان روتور می باشد که با افزایش دمای موتور این مقدار نیز کاهش می یابد. مقادیر واقعی توان اکتیو و توان راکتیو استاتور از روابط زیر بدست می آیند:

$$P_s = \frac{3}{2} |\vec{u}_s| \cdot i_{sy} \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} |\vec{u}_s| \cdot i_{sx}$$

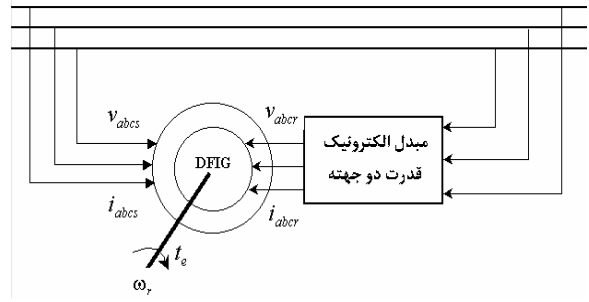
مطابق با شکل ۴، دو کنترل کننده فازی - عصبی تطبیقی (NFC) که در بخش بعد به آن پرداخته می شود، مقادیر مرجع جریان های دو راستای x, y روتور را تعیین می نمایند. از دو کنترل کننده PID برای ردیابی جریان های مرجع روتور از دو کنترل کننده PID برای ردیابی جریان های مرجع روتور تعیین شده استفاده گردیده است.

تمام محاسبات کنترلی در دستگاه دوار xy شار استاتور انجام می گردد، لذا از تبدیل های مناسب در بخش های مختلف استفاده شده است [5]. نهایتاً فرمان های ولتاژ مرجع به اینورتر دو جهت متصل به مدار موتور اعمال شده و ولتاژهای قدرت لازم، تولید می گردند. در بخش های بعد، پس از بیان ساختار کنترل کننده های فازی - عصبی بکار رفته در شکل ۴، مدل بدست آمده از حیث عملکرد آزمایش می شود.

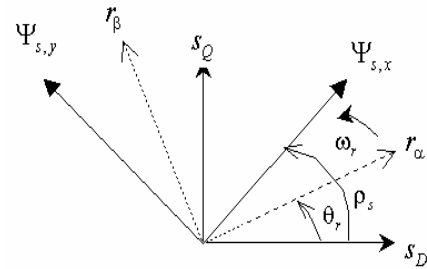
۵. طراحی کنترل کننده فازی - عصبی (NFC)

سیستم های فازی-عصبی را می توان به دو شکل مختلف پیاده سازی نمود. در شکل اول می توان از عملیات فازی و یا اعداد فازی در شبکه های عصبی استفاده نمود. در شکل دوم که در این مقاله از آن استفاده شده است می توان سیستم فازی را به صورت عصبی تحقق بخشید. در این رویکرد، علاوه بر خاصیت استنتاج فازی، سادگی و قابلیت تفسیر نیز به خواص شبکه های عصبی اضافه می شود.

در شکل ۵ ساختار شبکه فازی-عصبی با روش استنتاج ممدانی که از این به بعد آنرا M-NFC می نامیم نشان داده شده است [10, 11]. در لایه اول که لایه ورودی نیز نام دارد، یک ضریب جهت نگاشت کمیت های ورودی به فاصله [-1,1] عمل می کند.



شکل ۲. ماشین القایی تغذیه شونده از دو طرف استاتور و روتور



شکل ۳. دستگاههای مختصات دو محوری واقع بر استاتور، روتور و میدان دوار شار استاتور

معادلات دیفرانسیل حاکم بر ولتاژها و جریان های دو راستای x, y استاتور و روتور یک ماشین القایی عبارتند از:

$$\begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ u_{rx} \\ u_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_{ms}L_s & pL_m & -\omega_{ms}L_m \\ \omega_{ms}L_s & R_s + pL_s & \omega_{ms}L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_{ms} - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & -(\omega_{ms} - \omega_r)L_r \\ (\omega_{ms} - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega_{ms} - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix} \quad (7)$$

در روابط فوق، $u_{sx}, u_{sy}, i_{sx}, i_{sy}$ ، $u_{rx}, i_{rx}, u_{ry}, i_{ry}$ ، جریان ها و ولتاژهای استاتور و روتور می باشند. ω_{ms} نیز به ترتیب سرعت زاویه ای میدان دوار شار استاتور و سرعت زاویه ای الکتریکی روتور هستند. علامت p مبین علامت مشتق بوده و سرعت روتور نیز از معادله زیر بدست می آید:

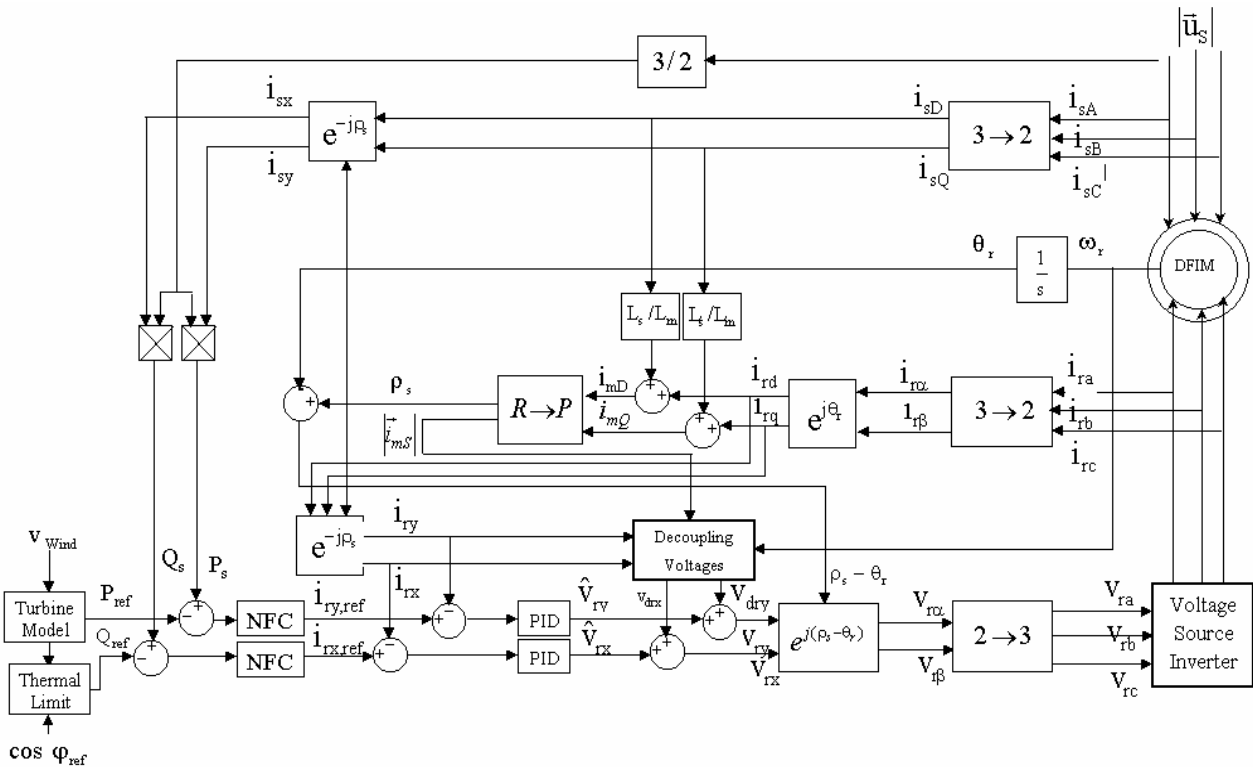
$$t_e - t_{mech} = J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (8)$$

که در آن t_e ، گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده است و مقدار آن برابر است با:

$$t_e = -\frac{3}{2} Z_p L_m (i_{sx} i_{ry} - i_{ry} i_{sx}) \quad (9)$$

۴. طراحی سیستم کنترل توان ماشین DFIG

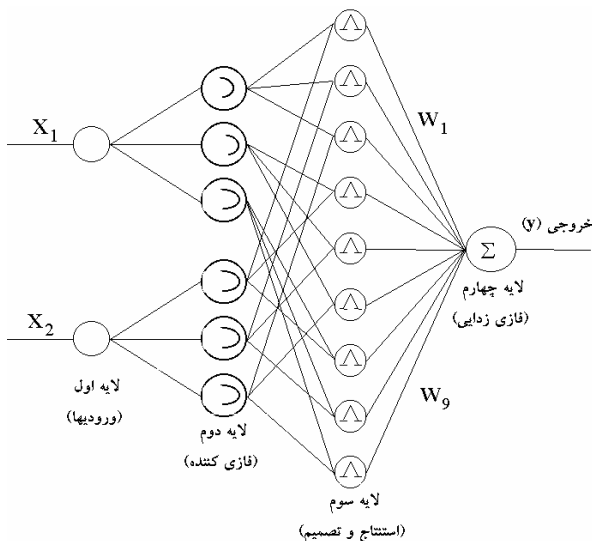
در شکل ۴ بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل توان اکتیو و توان راکتیو به روش کنترل برداری نمایش داده شده است. استاتور ماشین به شبکه قدرت متصل بوده و روتور نیز از طریق یک اینورتر منبع ولتاژ PWM تغذیه می گردد. متناظر با مقداری معین از سرعت باد، مدل توربین مقدار مرجع توان اکتیو را تعیین می نماید.



شکل ۴. بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل توان ماشین القایی با تغذیه دوگانه

طول زمان بهینه نمود. لذا تابع انرژی E به صورت ذیل تعریف می شود:

$$E = \frac{1}{2} r^2 \quad (7)$$



شکل ۵. ساختار شبکه فازی - عصبی مورد استفاده

هدف از یادگیری، کمینه کردن مقدار E است. لذا باید تغییرات وزن ها در خلاف جهت گرادیان E صورت گیرد:

در لایه دوم که لایه فازی کننده نیز نامیده می شود میزان تعلق ورودی ها به مجموعه های فازی ورودی محاسبه می شود. در این لایه برای هر مجموعه فازی یک نورون قرار می دهیم. در شکل ۶ مجموعه های فازی مربوط به هر متغیر فازی نشان داده شده است. لایه سوم لایه تصمیم گیری و استنتاج فازی است.

با توجه به تعداد مجموعه های فازی (۳ مجموعه)، ۹ قانون کنترلی بدست می آید که در این لایه به ازای هر قانون یک نورون وجود دارد. در لایه چهارم یا لایه فازی زدایی، قسمت تالی قوانین کنترلی قرار داشته و عمل فازی زدایی نیز بصورت توامان در آن انجام می شود. در این لایه متناظر با هر خروجی کنترلی کننده، یک نورون قرار دارد.

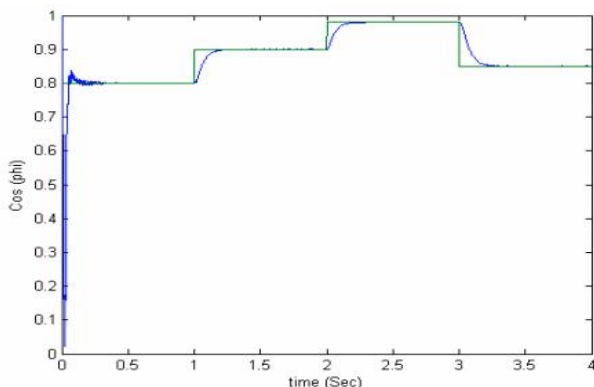
یادگیری تقویتی یکی از روش های یادگیری در مسائل کنترلی می باشد. این روش تنها با اتکا به اطلاعات کیفی از عملکرد سیستم قادر به یادگیری بوده و جهت کاربردهای کنترلی بسیار موفق است.

شکل ۷ جایگاه کنترل کننده فازی-عصبی با یادگیری تقویتی (ELIC) را در کنترل سیستم ها نشان می دهد. می توان نقاد را به صورت یک سیستم PD ساده به شکل $r = k_1 e + k_2 \dot{e}$ تعریف نمود که در آن سیگنال تقویت r بصورت ترکیب خطی خطا و مشتق خطا است. سیگنال r ، معرف تنش کلی سیستم بوده و هدف کنترل، کم کردن این تنش است. به عبارت دیگر باید r را در

آن، مدل کامل نیروگاه بادی را بدست آورده و مساله توزیع توان راکتیو بین ژنراتورها را بررسی نمود. ضرایب کنترل کننده های PID حلقه های داخلی (کنترل جریان) برای i_{sv} , i_{sx} به ترتیب برابر با $k_I = 10000$, $k_P = 500$ و $k_I = 10000$, $k_P = 600$ بوده و نقاد کنترل کننده فازی - عصبی حلقه های توان اکتیو و راکتیو نیز بصورت $r = 10e + \dot{e}$ قرار داده شده است.

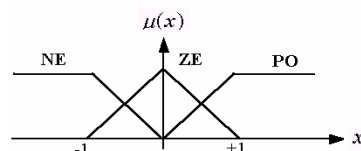
در حالت اول، ژنراتور در شرایط سرعت باد ثابت $(v_{Wind} = 12 m/s)$ ، تحت تغییرات ضریب توان مرجع قرار می گیرد. شکل ۸ تغییرات ضریب توان مرجع و واقعی ماشین را نمایش می دهد. ضریب توان مرجع بین مقادیر 0.8 تا 0.98 بطور متناوب تغییر می نماید. عملکرد سیستم کنترل قابل توجه بوده و ردیابی بخوبی و بدون هیچ نوسانی انجام می گیرد. شکل ۹ نیز تغییرات توان های اکتیو و راکتیو مرجع و واقعی را نمایش می دهد. ردیابی توان مرجع، بدروستی و بسرعت انجام می گیرد. شکل ۱۰ تغییرات ولتاژ و جریان روتور و مولفه های اکتیو و راکتیو جریان استاتور را نمایش می دهد. با توجه به اینکه با تغییر ضریب توان مرجع، توان راکتیو مرجع توسط سیستم کنترل تغییر می نماید لذا i_{rx} تغییر نموده ولی i_{ry} ثابت باقی می ماند. شکل ۱۱ نیز تغییرات سرعت زاویه ای روتور را نمایش می دهد.

حال اثر تغییرات سرعت باد بر عملکرد سیستم کنترل بررسی می گردد. همانطورکه اشاره شد با تغییر سرعت باد، سیستم شکل ۴ باید متناظر با توان اکتیو مرجع، متغیر i_{ry} را بطور مناسب تغییر دهد.

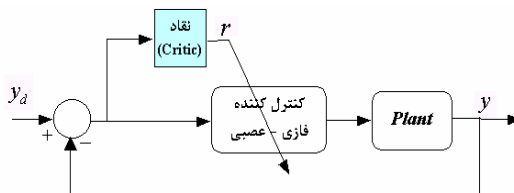


شکل ۸. ردیابی ضریب توان مرجع با تغییر $\cos \phi_{ref}$

از طرفی با اعمال مقدار مرجع ضریب توان به سیستم با توجه به ظرفیت حرارتی ماشین سیستم کنترل مقدار توان راکتیو مرجع را تعیین و از آن برای کنترل متغیر i_{rx} استفاده می نماید. شکل ۱۲ تغییرات سرعت باد نمونه را نشان می دهد. در شکل ۱۳ عملکرد سیستم کنترل در حالتی که سرعت باد بطور متناوب مطابق شکل ۱۲ تغییر می کند نمایش داده شده است. ضریب توان مرجع در مقدار ثابت 0.9 تنظیم گردیده است.



شکل ۶. مجموعه های فازی مربوط به متغیرهای فازی



شکل ۷. کنترل کننده فازی - عصبی با یادگیری تقویتی

$$\Delta W_i \propto -\frac{\partial E}{\partial W_i} \quad (8)$$

در صورت استفاده از کنترل کننده فازی - عصبی به روش ممدانی و با استفاده از قانون مشتقات زنجیره ای، قانون یادگیری به شکل زیر بدست خواهد بود:

$$W_{i_{new}} = W_{i_{old}} + \Delta W_i = W_{i_{old}} + \eta r e \frac{u_i^4}{\sum_{i=1}^n u_i^4} \quad (9)$$

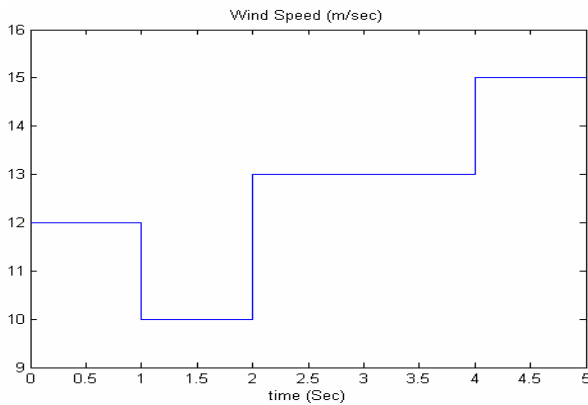
که در آن، η ضریب یادگیری کنترل کننده می باشد. از دیدگاه کنترلی فرمول یادگیری ELIC، اصلاح شده فرمول پس انتشار خطا از سیستم می باشد که در آن r به عنوان ضریب تصحیح اضافه شده است. به بیان دیگر r حاوی اطلاعاتی درباره دینامیک سیستم می باشد و با اضافه نمودن آن، روش پس انتشار خطا از سیستم که استاتیکی می باشد اصلاح شده و به صورت دینامیکی عمل می نماید و در نتیجه سرعت و کیفیت یادگیری بالاتر می رود. می توان قوانین یادگیری را طبق قانون پس انتشار خطا، به لایه های دیگر کنترل کننده هم انتشار داد و اقدام به تربیت لایه فازی کنترل کننده نیز نمود اما از نظر تئوری این عمل لزومی ندارد و چنانچه مجموعه های فازی ورودی، همه فضا را بصورت کامل تقسیم کرده و همپوشانی لازم را داشته باشند، می توان با تربیت لایه آخر، هر نگاشتی را با دقت مناسب تقریب زد. لذا فقط ۹ ضریب وزنی لایه آخر آموزش می بینند. بدلیل آموزش On-Line و وجود نقاد، مقادیر اولیه جهت آموزش شبکه عصبی تاثیر چندانی بر کیفیت آموزش ندارد و مقادیر ضرایب لایه آخر، ابتدائاً برابر با صفر فرض شده اند.

۶. آزمایش عملکرد سیستم کنترل توان DFIM

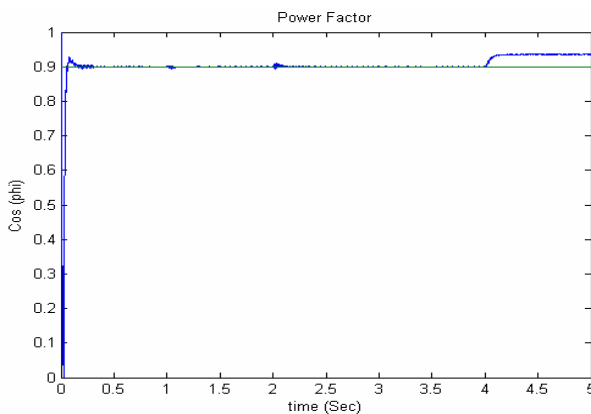
با در نظر گرفتن مدل بدست آمده در بخش ۳ و اطلاعات ژنراتور ارائه شده در ضمیمه، عملکرد سیستم کنترل توان ماشین DFIM شکل ۴ در چند حالت شبیه سازی می گردد تا بتوان با استفاده از

ابوالفضل حلوایی نیاسر

مشاهده می گردد که در زمان $t = 4 \text{ Sec}$ وقتی سرعت باد به $v_{Wind} = 15 \text{ m/sec}$ افزایش می یابد با افزایش توان اکتیو تولیدی، بدلیل حد ظرفیت حرارتی ژنراتور، مقدار توان راکتیو مرجع محدود شده و لذا سیستم کنترل نمی تواند ضریب توان مرجع را که برابر 0.9 می باشد دنبال نماید. در شکل ۱۴ تغییرات توان های اکتیو و راکتیو نمایش داده شده اند. توان اکتیو با توجه به سرعت باد تغییر می نماید و توان راکتیو نیز برای ثابت ماندن ضریب توان در سرعت های متفاوت باد تغییر می کند.

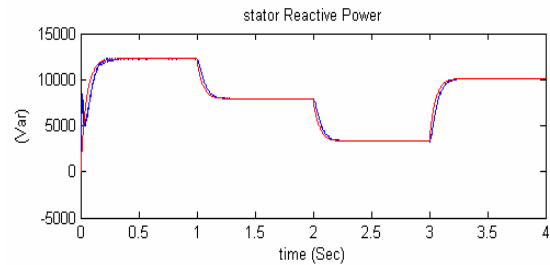
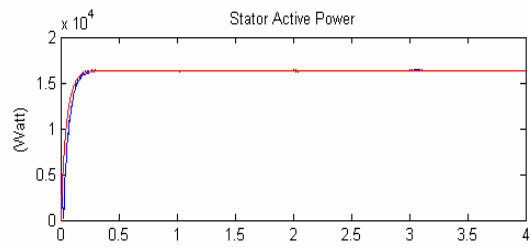


شکل ۱۲. تغییر سرعت باد در تست عملکرد سیستم کنترل

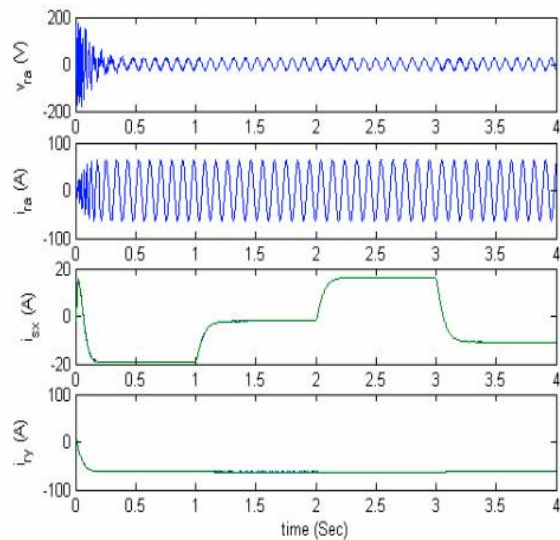


شکل ۱۳. ردیابی ضریب توان مرجع با تغییر سرعت باد

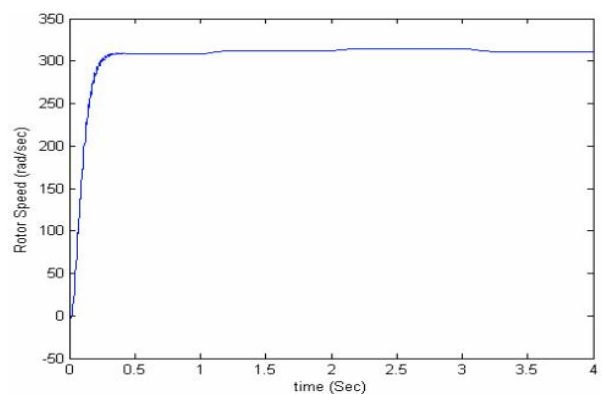
البته در $t = 4 \text{ Sec}$ مقدار توان راکتیو مرجع با توجه به حد ظرفیت حرارتی ماشین به مقدار کمتری محدود شده است. عملکرد سیستم کنترل در این حالت نیز قابل قبول است. از شبیه سازی های ارائه شده نتیجه می شود که سیستم کنترل بخوبی عمل نموده و عملکرد کنترل کننده فازی - عصبی حلقه های توان اکتیو و راکتیو قابل توجه می باشد [9]. همچنین ملاحظه می گردد که پاسخ سیستم به تغییرات ضریب توان همانند یک سیستم مرتبه اول می باشد. در بخش بعد با استفاده از مدل ژنراتور القایی بدست آمده به مدل سازی یک نیروگاه بادی و توزیع توان راکتیو بین ژنراتورهای نیروگاه بادی با استفاده از کنترل کننده هوشمند فازی - عصبی ارائه شده در بخش ۴ پرداخته می شود.



شکل ۹. تغییرات توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با تغییر $\cos \varphi_{ref}$



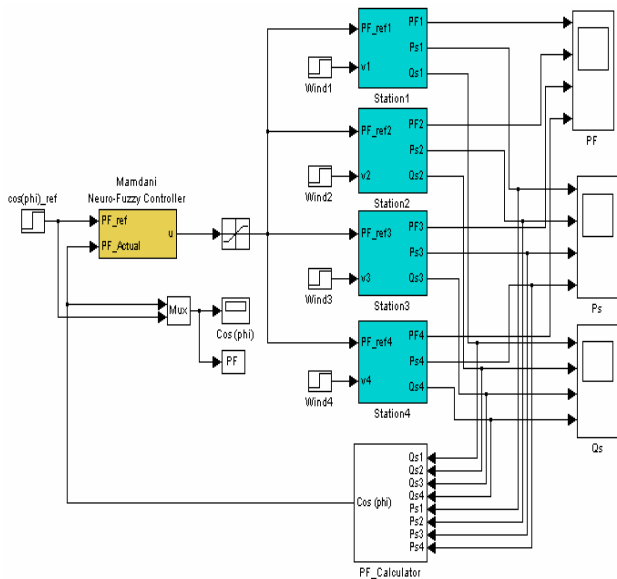
شکل ۱۰. تغییرات ولتاژ و جریان روتور با تغییر $\cos \varphi_{ref}$



شکل ۱۱. تغییرات سرعت زاویه ای روتور با تغییر $\cos \varphi_{ref}$

مشاهده می شود که ردیابی ضریب توان به خوبی انجام می گیرد و تغییرات سرعت باد در صورتی که در حد ظرفیت حرارتی ماشین باشد، اثری بر مقدار ضریب توان ماشین ندارد. اما در شکل ۱۳

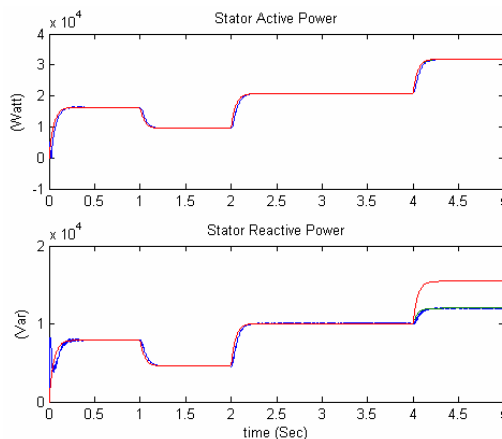
عصبی (NFC) ارائه شده در بخش ۴ برای کنترل توان راکتیو کل نیروگاه بادی استفاده می شود [7, 8].



شکل ۱۵. توزیع توان راکتیو بین چهار ژنراتور DFIG

شکل ۱۵ کنترل توان راکتیو نیروگاه بادی و یا به عبارتی توزیع توان راکتیو بین ژنراتورهای یک نیروگاه بادی شامل چهار ژنراتور DFIG را نمایش می دهد. مطابق این شکل پس از تعیین ضریب توان مرجع نیروگاه بادی، این ضریب توان بطور یکسویه به تمامی ژنراتورها اعمال می گردد. در این حالت ممکن است بعضی از ژنراتورها در حدود ظرفیت حرارتی خود توان تولید نمایند. توان تولیدی هر ژنراتور در بلوک PF_Calculator وارد شده و ضریب توان واقعی نیروگاه بادی محاسبه می شود. این مقدار، بعنوان فیدبک به کنترل کننده NFC وارد شده و بطور حلقه بسته مقادیر جدید ضریب توان هر ژنراتور مجدداً تعیین می گردند. در این سیستم کنترل علاوه بر کاهش حجم محاسبات و حلقه بسته بودن عمل کنترل، از مزایای مقاوم بودن کنترل کننده NFC در مواجهه با تغییرات باد استفاده می شود که در ادامه توسط شبیه سازی ها نشان داده شده است.

ابتدا ردیابی ضریب توان نیروگاه بادی نشان داده می شود. سرعت باد برای ژنراتورهای ۱ و ۲ برابر 10 m/sec و برای ژنراتورهای ۳ و ۴ برابر 12 m/sec و بدون تغییر می باشند. ضریب توان نیز بطور متناوب تغییر می نماید. شکل ۱۶ تغییرات ضریب توان کل نیروگاه بادی را نمایش می دهد. عملکرد قابل توجه کنترل کننده NFC سبب همگرایی و ردیابی سریع ضریب توان مرجع شده است. شکل ۱۷، مقادیر ضریب توان مرجع و واقعی هر ژنراتور DFIG را نمایش می دهد. مقایسه شکل ۱۶ و مجموعه شکل های ۱۷ نشان می دهد که ردیابی ضریب توان کل بهتر از ردیابی تک تک ایستگاه ها انجام می شود.



شکل ۱۴. تغییرات توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با تغییر سرعت باد

۷. مدل سازی و کنترل توان راکتیو یک نیروگاه بادی

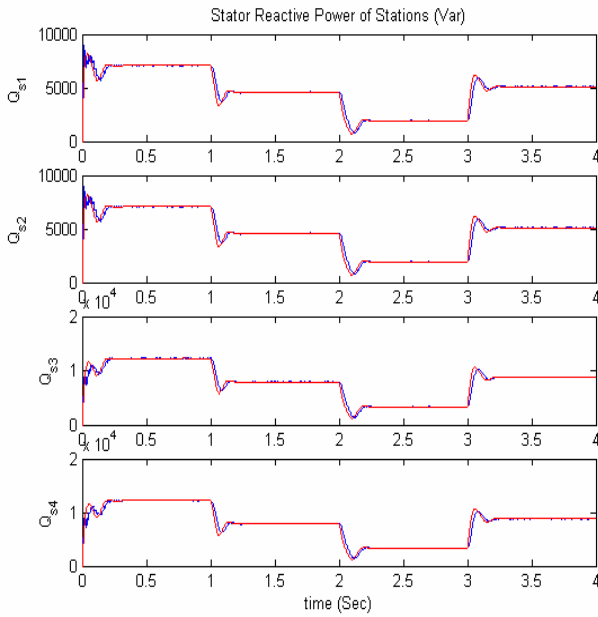
یک نیروگاه بادی را می توان بصورت اتصال موازی n مدل ژنراتور DFIG مدل سازی نمود. سرعت باد در مورد هر ژنراتور می تواند متفاوت با سایر ژنراتورها باشد. همچنین بعضی ژنراتورها می توانند از شبکه جدا شوند در حالیکه دیگر ژنراتورها در حداکثر تولید توان خود باشند [3, 8]. توان اکتیو و توان راکتیو کل نیروگاه بادی به ترتیب با مجموع توان اکتیو و توان راکتیو ژنراتورهای القایی برابر بوده و از روابط

$$P_{S,total} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (12)$$

$$Q_{S,total} = \sum_{i=1}^n q_i$$

بدست می آیند که در آن $P_{S,total}$ کل توان اکتیو تولید شده و $Q_{S,total}$ کل توان راکتیو جذب شده یا تولید شده در نیروگاه بادی می باشند. p_i و q_i نیز توان اکتیو و توان راکتیو تولید شده توسط ژنراتور i ام هستند. بلوک دیاگرام شبیه سازی نیروگاه بادی در محیط Matlab/Simulink در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. مدل نمایش داده شده در این شکل، فقط شامل چهار ژنراتور می باشد.

الگوریتم های متفاوتی برای کنترل و توزیع توان راکتیو یک نیروگاه بادی که از ژنراتورهای DFIG بهره می برند، ارائه شده است. در الگوریتم توزیع تناسبی کنترل توان راکتیو، با توجه به حدود ظرفیت حرارتی ماشین و مقدار ضریب توان مورد نیاز نیروگاه، مقدار کل توان راکتیو تحویل داده شده یا جذب شده به/از شبکه قدرت بدست می آید. مطابق این الگوریتم، سهم توان راکتیو هر ژنراتور متناسب با حداکثر توان راکتیو مجاز آن با توجه به مقدار تولید توان اکتیو تعیین می گردد. سپس مقدار ضریب توان مرجع هر ژنراتور بدست می آید. این الگوریتم نیاز به محاسبات فراوانی داشته و به تغییرات سرعت باد نیز حساس است. در این مقاله از کنترل کننده فازی -

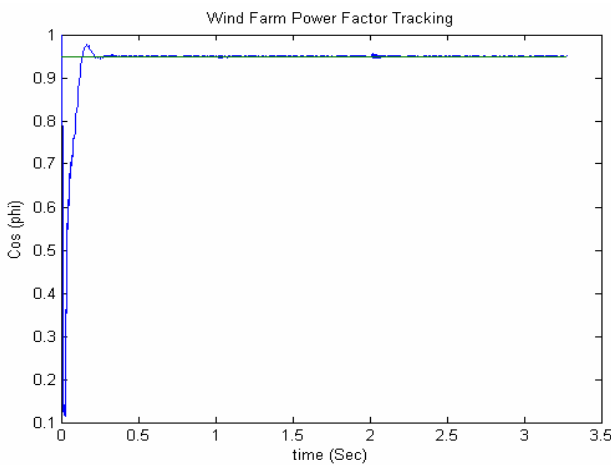


شکل ۱۸. ردیابی و تغییرات توان راکتیو هر ایستگاه

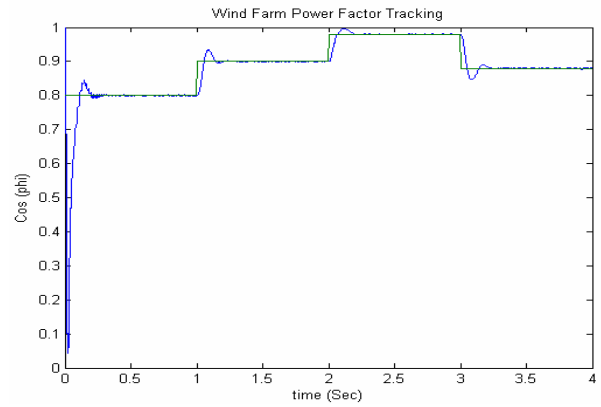
ردیابی ضریب توان نیروگاه بادی در تمام سرعت های باد داده شده که ماشین ها در حدود ظرفیت گرمایی خود قرار نمی گیرند، بخوبی انجام می گیرد. نتایج در دو شکل ۱۹ و ۲۰ آورده شده اند. تغییرات سرعت باد مطابق شکل ۱۲ است.

۸. نتیجه گیری

از آنجا که تنظیم توان راکتیو یک نیروگاه بادی متصل به شبکه، برای نگهداری پارامترهای شبکه نظیر ولتاژ و پایداری شبکه، از اهمیت ویژه ای برخوردار است، در این مقاله به بررسی مساله کنترل و تنظیم توان راکتیو در نیروگاه های بادی که از ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه (DFIG) بهره می برند، پرداخته شد.



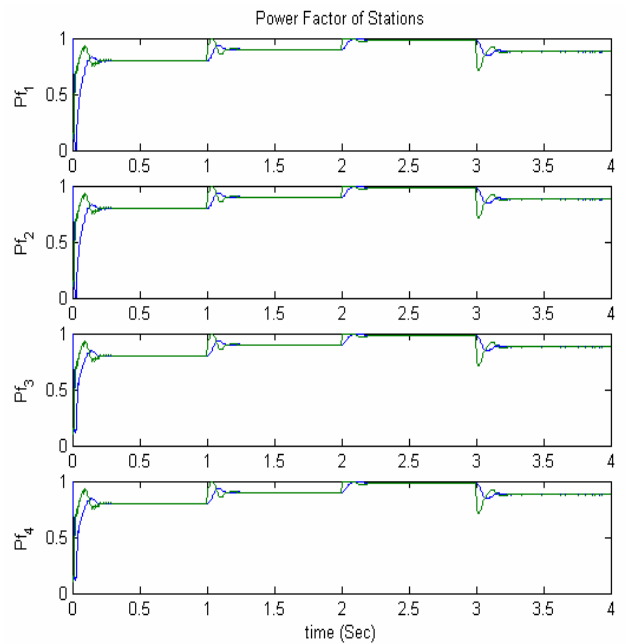
شکل ۱۹. ردیابی ضریب توان نیروگاه بادی با تغییر سرعت باد



شکل ۱۶. ردیابی ضریب توان مرجع نیروگاه بادی

شکل ۱۸ مقادیر مرجع توان راکتیو هر ایستگاه یا ژنراتور را نمایش می دهد. بدلیل پائین بودن سرعت باد و لذا تولید کمتر توان اکتیو توسط هر ژنراتور، ردیابی توان راکتیو بطور کامل انجام شده و مقدار توان راکتیو مرجع هیچ ژنراتوری، محدود نشده است.

حال اثر تغییر باد بر ردیابی ضریب توان مرجع نیروگاه بادی بررسی می گردد. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، افزایش سرعت باد سبب تولید توان اکتیو بیشتر و لذا سبب محدودیت تولید توان راکتیو ژنراتور خواهد گردید. ضریب توان مرجع برابر 0.95 فرض می شود.



شکل ۱۷. ردیابی ضریب توان مرجع هر ایستگاه

[2] Arantxa Tapia, Gerardo Tapia, J. Xabier Ostolaza, and José Ramón Senz, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003, pp. 194-204.

[3] Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J.X., Saenz, J.R., Criado, R., Berasategui, J.L., "Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators. I", IEEE Proceedings of Power Tech, 2001, Vol. 4, Page(s): 6.

[4] Muller, S., Deicke, M., De Doncker, R.W., "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, Issue: 3, May-June 2002, pp. 26-33.

[5] Vas P., *Vector Control of AC Machines*, Oxford University Press, New York, 1990.

[6] Rabelo, B., Hofmann, W., "Optimal active and reactive power control with the doubly-fed induction generator in the MW-class wind", IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2001, Vol. 1, pp. 53-58.

[7] Saenz, J.R., Tapia, A., Tapia, G., Jurado, F., Ostolaza, X., Zubia, I., "Reactive power control of a wind farm through different control algorithms", IEEE International Conference on Power Electronics and Drives, 2001, pp. 203-207.

[8] Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J.X., Saenz, J.R., Criado, R., Berasategui, J.L., "Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators. II", IEEE Proceedings of Power Tech, 2001, Vol.4, Page(s): 5.

[9] Eel-Hawan Kim, Jae-Hong Kim, "Power Factor Control of a Doubly Fed Induction Machine using Fuzzy Logic", Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2001), Vol. 2, Aug. 2001, pp. 747-750.

[10] Lin, C., Lu, Y., "A Neural Fuzzy system with Fuzzy Supervised Learning", IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, Vol. 26, No. 5, Oct. 1996.

[11] Jang, J. R., "ANFIS: Adaptive-Neural-Based Fuzzy Inference System", IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, May/Jun. 1993, pp. 665-684.

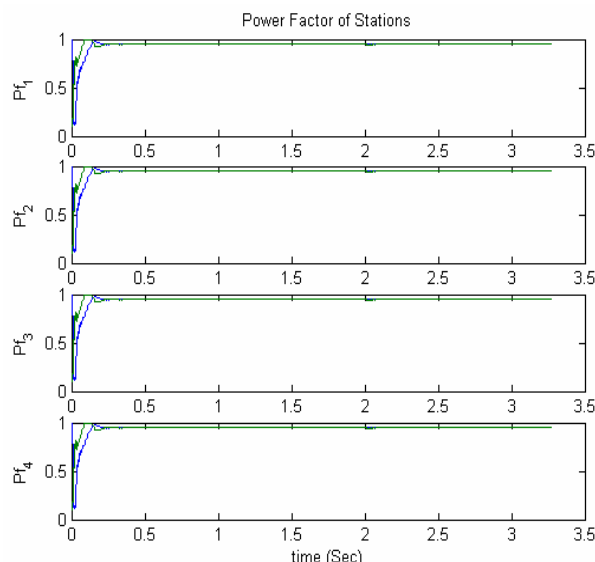
پارامترهای ژنراتور DFIG

$$R_s = 0.1062 \Omega, R_r' = 0.0764 \Omega$$

$$X_{ls} = 0.2145 \Omega, X_{lr}' = 0.2145 \Omega, X_m = 5.834 \Omega$$

$$u_s = 220 \text{ Volt}, S_{\text{rated}} = 20 \text{ hp}$$

$$f_s = 60 \text{ Hz}, Z_p = 4$$



شکل ۲۰. ردیابی ضریب توان هر ایستگاه با تغییر سرعت باد

برای کنترل توان راکتیو یک ژنراتور DFIG از کنترل کننده فازی-عصبی بر مبنای یادگیری تقویتی استفاده گردید. کنترل کننده مذکور علاوه بر ساختار ساده و داشتن حداقل پایگاه داده ها، همزمان از مزایای شبکه عصبی و سیستم فازی بهره می برد. از این کنترل کننده برای کنترل هر دو توان اکتیو و راکتیو ژنراتور DFIG استفاده گردید. قابلیت بالای این کنترل کننده در ردیابی ضریب توان مرجع ژنراتور با شبیه سازی به اثبات رسید. سپس از کنترل کننده NFC ارائه شده برای کنترل ضریب توان یک نیروگاه بادی با چهار ژنراتور استفاده شد و مشاهده گردید که کنترل کننده ارائه شده علیرغم این عیب که ممکن است بعضی از ژنراتورها در حدود اشباع خود کار کنند، اما از ساختار و محاسبات ساده برخوردار بوده و بخوبی ردیابی ضریب توان مرجع را انجام داده و در برابر تغییرات سرعت باد نیز مقاوم بود. از مدل نیروگاه بادی ارائه شده می توان در مطالعات و زمینه های مختلف تحقیقاتی در ارتباط با نیروگاه های بادی استفاده نمود.

مراجع

[1] Sloopweg, J., Polinder, H., Kling, W.L., "Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, Vol. 1, pp. 644-649.