

کنترل و توزیع توان راکتیو بین ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه در یک

نیروگاه بادی، به روش فازی-عصبی

محسن کلانتر^۴

حسن مقبلی^۳
دانشگاه صنعتی اصفهان

ابوالفضل حلوائی نیاسر^۱ احد کاظمی^۲
دانشگاه علم و صنعت ایران^{۱،۲}

چکیده

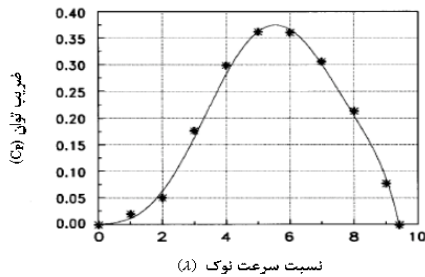
در این مقاله مساله کنترل و توزیع توان راکتیو در نیروگاه بادی بین ژنراتورهای القایی با تغذیه از دو طرف روتور و استاتور، بررسی شده است. پس از مروری مختصر بر مدل یک توربین بادی، مدل دینامیکی یک ماشین القایی در دستگاه مختصات میدان دوار شار استاتور استخراج و شبیه سازی گردیده است. بمنظور کنترل مقاوم توان راکتیو 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 سازیها 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، یادگیری تقویتی، ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه، نیروگاه بادی، کنترل برداری.

۱- مقدمه

استفاده از انرژی باد بعنوان یکی از جدیدترین و مهم ترین منابع 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 [۱ و ۲ و ۳].

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 [۴].



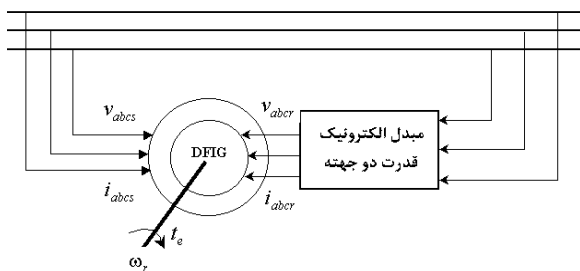
شکل ۱: تغییرات ضریب توان یک توربین بادی

برحسب λ را برحسب یک مقدار سرعت باد مشخص، برای یک توربین بادی نمونه نمایش می دهد. 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 [۴ و ۵].

۳- مدل دینامیکی ژنراتور DFIM

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 [۵].

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 xy واقع بر شار میدان استاتور منتقل می شوند [۲ و ۵]. معادلات دیفرانسیل حاکم بر



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

با بکار بردن روش های کنترلی مناسب، توان راکتیو می تواند مستقل از توان اکتیو ژنراتور و با در نظر گرفتن محدودیت های مربوط به ظرفیت حرارتی ماشین، کنترل گردد. روش کنترل برداری سبب کنترل مستقل از هم توان های راکتیو و اکتیو ماشین می شود [۶ و ۵]. روش های کنترل غیرخطی و بهینه نیز در کنترل ضریب توان ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه بکار برده شده اند [۷]. 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 [۶ و ۸]. لذا در این مقاله از یک کنترل کننده فازی-عصبی تطبیقی و مقاوم برای این منظور استفاده می گردد.

در ادامه مقاله، ابتدا پس از بیان نحوه تولید انرژی توسط توربین بادی، به استخراج مدل کامل یک ژنراتور DFIM 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 DFIM استفاده می شود. در نهایت مدل یک نیروگاه بادی شامل چهار ژنراتور DFIM بررسی و از کنترل کننده فازی-عصبی ارائه شده برای کنترل ضریب توان کل نیروگاه بادی، استفاده می شود.

۲- مدل توربین بادی

مدلهای 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، R و ρ به ترتیب چگالی هوا و شعاع توربین بوده و λ و v نیز نسبت سرعت نوک و سرعت خطی باد می باشند [۲]. در رابطه (۱)، $C_p(\lambda)$ ثابت توان بوده و تابعی غیرخطی از سرعت باد و سرعت زاویه ای محور توربین می باشد. شکل ۱ مثالی از تغییرات ضریب توان

تعیین می شود [۶۲]. مقادیر توانهای مرجع اکتیو و راکتیو همواره باید در رابطه زیر صدق نمایند [۳ و ۸]:

$$P_{ref}^2 + \left(Q_{ref} - \frac{3}{2} \left| u_s \right| \frac{L_m}{L_s} \frac{|u_s|}{\omega_1 L_m} \right)^2 = \left(\frac{3}{2} \left| u_s \right| \frac{L_m}{L_s} \right)^2 (i_{rMAX}^2) \quad (۳)$$

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

$$P_s = \frac{3}{2} |\bar{u}_s| \cdot i_{sy} \quad (۴)$$

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

مطابق شکل ۳، دو کنترل کننده فازی - عصبی تطبیقی، مقادیر مرجع جریان های دو راستای x, y روتور را تعیین می نمایند. تمام محاسبات کنترلی در دستگاه دوار xy شار استاتور انجام می گردد. نهایتاً فرمانهای ولتاژ مرجع به اینورتر دو جهته 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 ۳، مدل بدست آمده از حیث عملکرد آزمایش می شود.

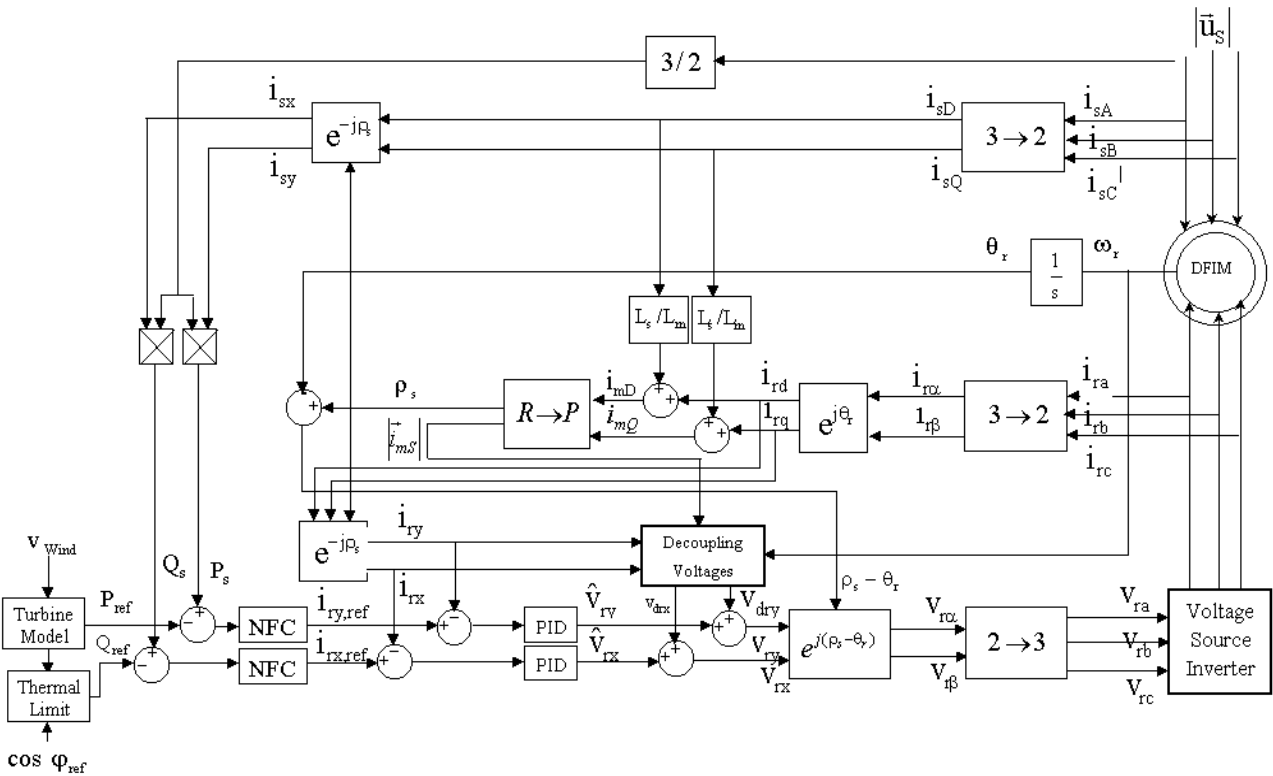
ولتاژها و جریان های دو راستای x, y استاتور و روتور یک ماشین القایی عبارتند از:

$$\begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ u_{rx} \\ u_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_{ms}L_s & pL_m & -\omega_{ms}L_m \\ \omega_{ms}L_s & R_s + pL_s & \omega_{ms}L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_{ms} - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & -(\omega_{ms} - \omega_r)L_r \\ (\omega_{ms} - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega_{ms} - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

در روابط فوق، $i_{sx}, i_{sy}, u_{sx}, u_{sy}$ ، جریان ها و ولتاژهای استاتور و $i_{rx}, i_{ry}, u_{rx}, u_{ry}$ ، جریان ها و ولتاژهای روتور می باشند. ω_{ms} و ω_r نیز به ترتیب سرعت زاویه ای میدان دوار شار استاتور و سرعت زاویه ای الکتریکی روتور هستند.

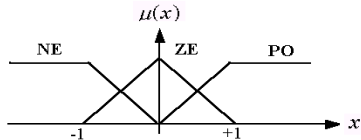
۴- طراحی سیستم کنترل توان ماشین DFIG

در شکل ۳ بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل توان های اکتیو و راکتیو به روش کنترل برداری نمایش داده شده است. متناظر با مقداری معین از سرعت باد، مدل توربین مقدار مرجع توان اکتیو را تعیین می نماید. 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



شکل ۳: بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل توان ماشین القایی با تغذیه دوگانه

۵- طراحی کنترل کننده فازی - عصبی (NFC)



شکل ۵: مجموعه های فازی مربوط به متغیرهای فازی

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

$$E = \frac{1}{2} r^2 \quad (5)$$

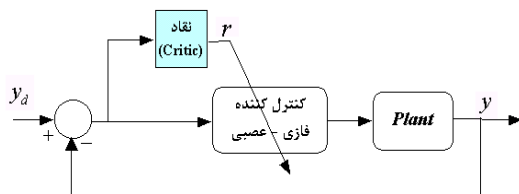
هدف از یادگیری، کمینه کردن مقدار E است. لذا باید تغییرات وزن ها در خلاف جهت گرادیان E صورت گیرد:

$$\Delta W_i \propto -\frac{\partial E}{\partial W_i} \quad (6)$$

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:

$$W_{i_{new}} = W_{i_{old}} + \Delta W_i = W_{i_{old}} + \eta r e \frac{u_i^4}{\sum_{i=1}^n u_i^4} \quad (7)$$

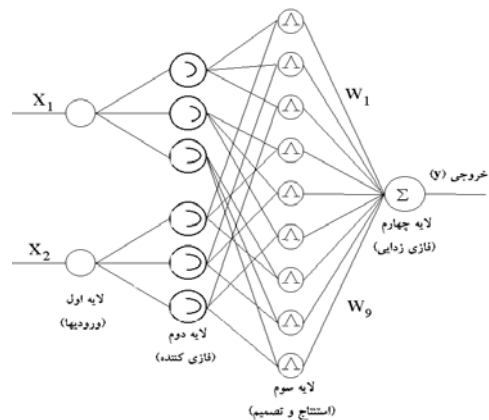
که در آن، η ضریب یادگیری کنترل کننده می باشد. از دیدگاه کنترلی، فرمول یادگیری ELIC، اصلاح شده فرمول پس انتشار خطا از سیستم می باشد که در آن r به عنوان ضریب تصحیح اضافه شده است. به بیان دیگر r حاوی اطلاعاتی درباره دینامیک سیستم می باشد و با اضافه نمودن آن، روش پس انتشار خطا از سیستم که استاتیکی می باشد اصلاح شده و به صورت دینامیکی عمل می نماید و در نتیجه سرعت و کیفیت یادگیری بالاتر می رود.



شکل ۶: کنترل کننده فازی - عصبی با یادگیری تقویتی

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. شکل ۴ ساختار شبکه فازی-عصبی مورد استفاده را نمایش می دهد [۱۰ و ۱۱]. در لایه اول که لایه ورودی نیز نام دارد، یک ضریب جهت نگاشت کمیت های ورودی به فاصله $[-1,1]$ عمل می کند. در لایه دوم که لایه فازی کننده نیز نامیده می شود میزان تعلق ورودی ها به مجموعه های فازی ورودی محاسبه می شود. در شکل ۵ مجموعه های فازی مربوط به هر متغیر فازی نشان داده شده است. لایه سوم لایه تصمیم گیری و استنتاج فازی است. در این لایه با توجه به تعداد مجموعه های فازی (۳ مجموعه)، ۹ قانون وجود دارد. در لایه چهارم یا لایه فازی زدایی، قسمت تالی قوانین کنترلی قرار داشته و عمل فازی زدایی نیز به صورت توام در آن انجام می شود. در این لایه متناظر با هر خروجی کنترل 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 ۶ جایگاه کنترل کننده فازی-عصبی با یادگیری تقویتی (ELIC) را در کنترل



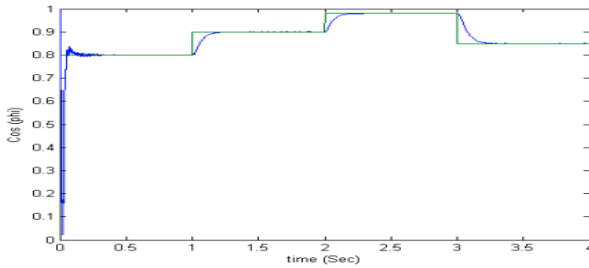
شکل ۴: ساختار شبکه فازی - عصبی مورد استفاده

۶- آزمایش عملکرد سیستم کنترل توان ماشین DFIG

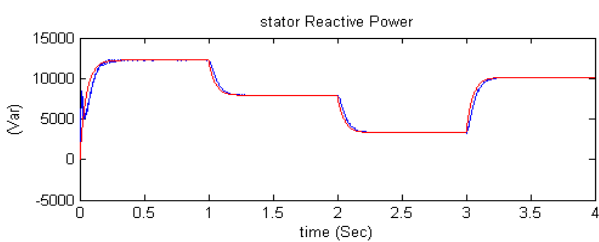
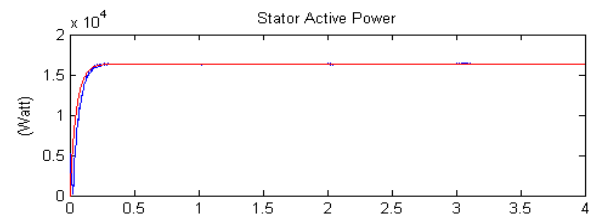
با در نظر گرفتن مدل بدست آمده در بخش ۳ و اطلاعات ژنراتور ارائه شده در ضمیمه، عملکرد سیستم کنترل توان ماشین DFIM شکل ۳ در چند حالت شبیه سازی می گردد تا بتوان با استفاده از آن، مدل کامل نیروگاه بادی را بدست آورده و مساله توزیع توان راکتیو بین ژنراتورها را بررسی نمود. ضرایب کنترل کننده های PID حلقه های داخلی (کنترل جریان) با سعی و خطا تعیین گردیده 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 ($v_{Wind} = 12 \text{ m/s}$)، تحت تغییرات ضریب توان مرجع قرار می گیرد. شکل ۷ 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 ۸ نیز تغییرات توان های اکتیو و راکتیو مرجع و واقعی را نمایش می دهد. ردیابی توان مرجع، بدرستی و بسرعت انجام می گیرد. شکل ۹ نیز تغییرات سرعت زاویه ای روتور را نمایش می دهد.

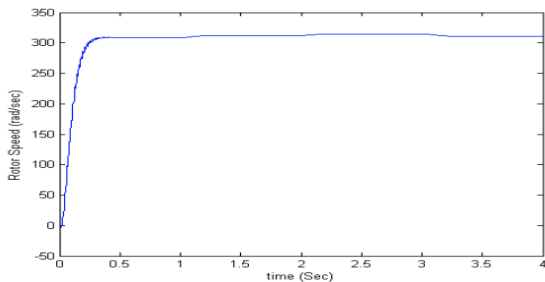
حال اثر تغییرات سرعت باد بر عملکرد سیستم کنترل بررسی می گردد. همانطور که اشاره شد با تغییر سرعت باد، سیستم شکل ۳ باید متناظر با توان اکتیو مرجع، متغیر $i_{r\beta}$ را بطور مناسب تغییر دهد. از طرفی با اعمال مقدار مرجع ضریب توان به سیستم با توجه به ظرفیت حرارتی ماشین سیستم کنترل مقدار توان راکتیو مرجع را تعیین و از آن برای کنترل متغیر $i_{r\alpha}$ استفاده می نماید. شکل ۱۰ تغییرات سرعت باد نمونه را نشان می دهد. در شکل ۱۱ عملکرد سیستم کنترل در حالتی که سرعت باد بطور متناوب مطابق شکل ۱۰ تغییر می کند نمایش داده شده است. ضریب توان مرجع در مقدار ثابت 0.9 تنظیم گردیده است. 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 ۱۱ مشاهده می



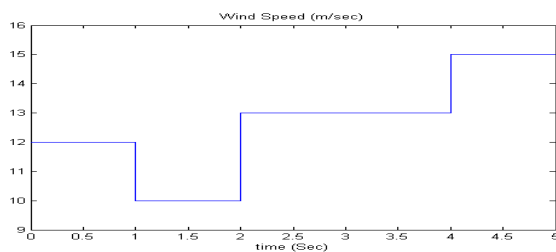
شکل ۷: ردیابی ضریب توان مرجع با تغییر $\text{COS } \varphi_{ref}$



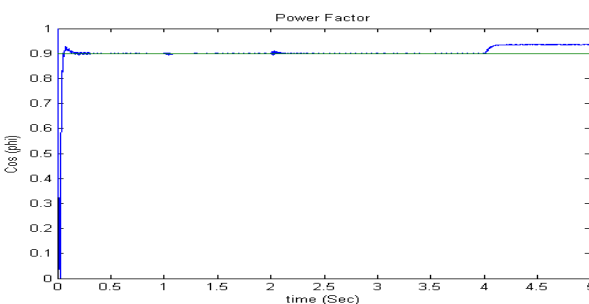
شکل ۸: تغییرات توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با تغییر $\text{COS } \varphi_{ref}$



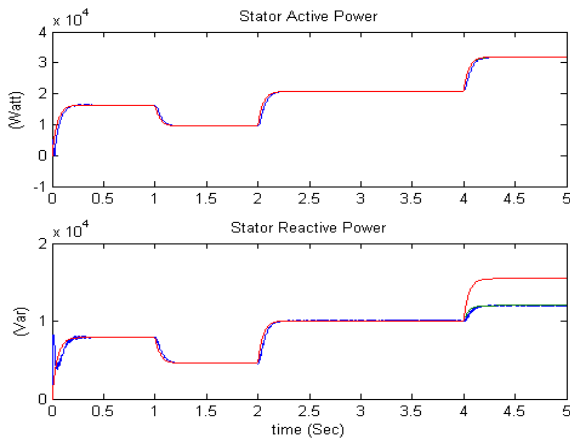
شکل ۹: تغییرات سرعت زاویه ای روتور با تغییر $\text{COS } \varphi_{ref}$



شکل ۱۰: تغییرات سرعت باد برای آزمایش عملکرد سیستم کنترل



شکل ۱۱: ردیابی ضریب توان مرجع با تغییر سرعت باد



شکل ۱۲: تغییرات توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با تغییر سرعت باد

کل توان راکتیو جذب شده یا تولید شده در نیروگاه $Q_{S,total}$ بادی می باشند. P_i و q_i نیز توانهای اکتیو و 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 - عصبی (NFC) ارائه شده در بخش ۴ برای کنترل توان راکتیو کل نیروگاه بادی استفاده می شود [۸ و ۷].

شکل ۱۳ 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

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 ۰.۹ می باشد دنبال نماید. در شکل ۱۲ 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. 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 گردد که سیستم کنترل بخوبی عمل نموده و عملکرد کنترل کننده فازی - عصبی حلقه های توان اکتیو و راکتیو قابل توجه می باشد [۹]. 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 مدلسازی 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.

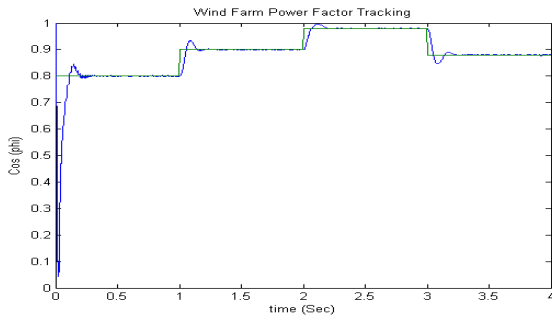
۷- مدلسازی و کنترل توان راکتیو یک نیروگاه بادی

یک نیروگاه بادی را می توان بصورت اتصال موازی n مدل ژنراتور DFIG مدلسازی 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 [۸ و ۳]. توانهای اکتیو و راکتیو کل نیروگاه بادی با مجموع توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتورهای القایی برابر بوده و از روابط

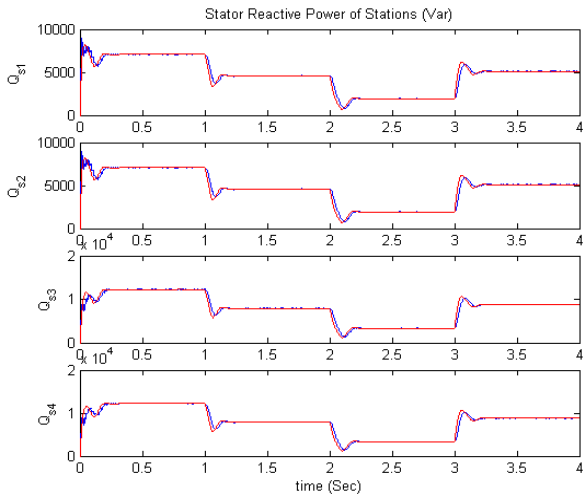
$$P_{S,total} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (12)$$

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

بدست می آیند که در آنها $P_{S,total}$ کل توان اکتیو تولید شده و

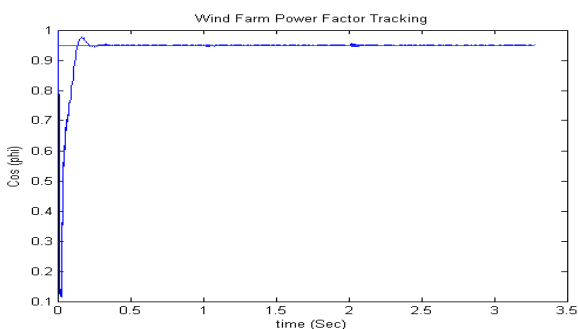


شکل ۱۴: ردیابی ضریب توان مرجع نیروگاه بادی

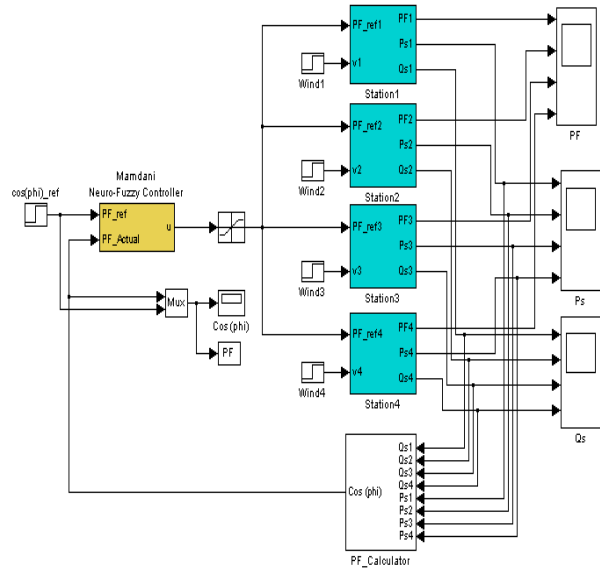


شکل ۱۵: ردیابی و تغییرات توان راکتیو هر ایستگاه

حالت 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. 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 شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده اند. تغییرات سرعت باد مطابق شکل ۱۰ است.



شکل ۱۶: ردیابی ضریب توان نیروگاه بادی با تغییر سرعت باد



شکل ۱۳: توزیع توان راکتیو بین چهار ژنراتور DFIG

حالت خود توان تولید نمایند. توان های 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 مجددا 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 می باشند. ضریب توان نیز بطور متناوب تغییر می نماید. شکل ۱۴ 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 ۱۵ مقادیر مرجع توان های 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.

۹- مراجع

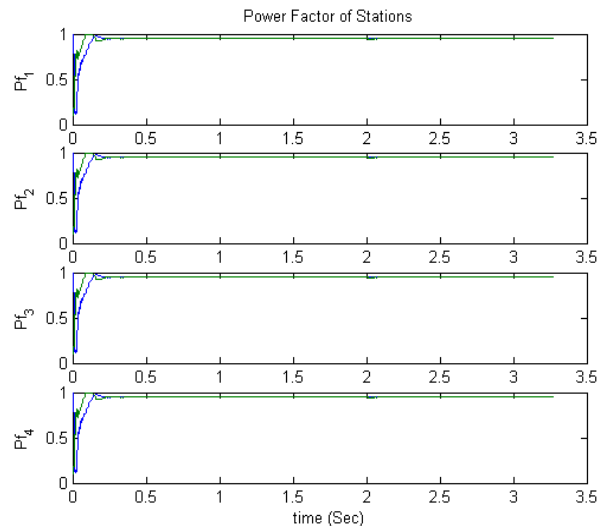
- [1]. J. Slootweg, H. Polinder; "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator", *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, IEEE*, Vol. 1, pp. 644-649.
- [2]. A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza; "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, June 2003, pp.194-204.
- [3]. A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J.R. Saenz; "Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators. I", *IEEE Proceedings of Power Tech*, 2001, Page(s): 6 pp. vol.4
- [4]. S. Muller, M. Deicke, R.W. De Doncker; "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE, Industry Applications Magazine*, Volume: 8 Issue: 3, May-June 2002, pp. 26-33.
- [5]. Vas P, *Vector Control of AC Machines*, Oxford University Press, New York, 1990.
- [6]. B. Rabelo, W. Hofmann; "Optimal active and reactive power control with the doubly-fed induction generator in the MW-class wind-turbines", *IEEE, International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2001, vol. 1, pp. 53-58.
- [7]. J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, F. Jurado; "Reactive power control of a wind farm through different control algorithms", 2001, *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive*, pp. 203-207.
- [8]. A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J.R. Saenz; "Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators. II", *IEEE Proceedings of Power Tech*, 2001, Page(s): 5 pp. vol.4
- [9]. E.H. Kim, J.H. Kim, "Power Factor Control of a Doubly Fed Induction Machine using Fuzzy Logic", ICEMS 2001, *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, Aug 2001, pp. 747-750.
- [10]. C. Lin, Y. Lu; "A Neural Fuzzy system with Fuzzy Supervised Learning"; *IEEE, Trans. Syst. Man and Cyber*, Vol. 26, No. 5, Oct. 1996.
- [11]. J.R. Jang; "ANFIS: Adaptive-Neural-Based Fuzzy Inference System"; *IEEE, Trans, Syst. Man Cyber.*, Vol. 23, No. 3. pp. 665-684, May/Jun. 1993.

ضمیمه: پارامترهای ژنراتور DFIG

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

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

$$u_s = 220^{Volt}, S_{rated} = 20^{hp}, f_s = 60^{Hz}, Z_p = 4$$



شکل ۱۷: ردیابی ضریب توان هر ایستگاه با تغییر سرعت باد

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.

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 توان های 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 ماشین ها 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.