



دومین کنفرانس سالانه انرژی پاک

2nd Annual Clean Energy Conference (ACEC)

کرمان، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی، پیشرفته علوم محیطی، ۲۳-۳۱ تیرماه ۱۳۹۱



ACEC2012-1181

مدلسازی و کنترل توان توربین‌های بادی سرعت متغیر با کنترلر پیش‌بین

صالحه افشاریان^۱، علی کریم پور^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشگاه فردوسی مشهد؛ sa_afsharian@yahoo.com

^۲عضو هیئت علمی و استادیار گروه مهندسی برق-کنترل، دانشگاه فردوسی مشهد؛ karimpor@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

با توجه به رشد روزافزون تکنولوژی و نیاز به انرژی، بشر به دنبال تولید انرژی‌هایی است که از آلودگی کمتری برخوردار باشند، بنابراین استفاده از انرژی باد برای تولید الکتریسیته، به طور مداوم و به سرعت در چند دهه گذشته افزایش یافته است. امروزه یکی از مسائل چالش‌برانگیز برای مهندسين طراحی کنترلر برای سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر، می‌باشد.

در این مقاله استراتژی کنترل چندمتغیره بر مبنای کنترلر پیش‌بین، برای کنترل توان سیستم توربین بادی سرعت متغیر ارائه شده است. ساختار پیشنهادی در تمام نواحی کاری سیستم، عمل کنترلر توان را انجام می‌دهد (ناحیه بار جزئی و بار کامل). زاویه پرها و گشتاور ژنراتور، برای دستیابی به توان ماکزیمم و کاهش بار بر روی محور توربین در ناحیه بار جزئی و تولید توانی صاف و بدون نوسان در ناحیه بار کامل کنترل می‌شوند.

مزیت اصلی این ساختار، اینست که از متدهای کنترل چندمتغیره، برای دستیابی به عملکرد مطلوب در تمامی نقاط کاری سیستم توربین بادی استفاده می‌کند.

برای نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، یک توربین 2MW در نظر گرفته شده است و نتایج شبیه‌سازی ارائه و مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند.

واژه های کلیدی: توربین بادی سرعت متغیر، کنترلر توان، کنترلر پیش‌بین

مقدمه

استفاده از انرژی باد روز به روز در حال گسترش است، بر طبق گزارش انجمن انرژی باد ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی در طول سال های ۲۰۰۹-۲۰۰۵ با نرخ متوسط ۲۷٪ در هر سال افزایش یافته است. با توجه به رشد روزافزون استفاده از انرژی باد، کنترل توربین‌های بادی روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد تا بتوان با حداکثر بهره‌وری از این سیستم استفاده کرد و انرژی قابل

اطمینان به شبکه تحویل داد. سیستم‌های کنترلی نقش بسیار مهمی را در توربین‌های بادی مدرن امروزی بازی می‌کنند. یک سیستم کنترلی که به خوبی طراحی شده باشد می‌تواند باعث افزایش بهره توربین‌ها شود و از طرف دیگر با کاهش بارهای مکانیکی و آبرودینامیکی بر روی سیستم عمر کاری آنها را افزایش دهد، و تمامی اینها موجب کاهش هزینه‌های انرژی تولیدی خواهد شد [۱]. به صورت کلی محدوده کاری توربین بادی به ۴ ناحیه تقسیم می‌شود که در دو ناحیه از این نواحی توربین راه اندازی نمی‌شود و در دو ناحیه دیگر اهداف کنترلی متفاوتی تعریف می‌شود.

در ناحیه دوم یا ناحیه بار جزئی سرعت باد بین دو سرعت وصل^۱ و سرعت نامی^۲ قرار دارد و هدف اصلی کنترلی در این ناحیه دستیابی به توان ماکزیمم با تنظیم سرعت رتور می‌باشد، در حالیکه زاویه چرخشی پرها در مقدار بهینه خود (خیلی نزدیک به صفر) ثابت شده است. در ناحیه سوم یا ناحیه بار کامل سرعت باد از مقدار نامی فراتر می‌رود. در این ناحیه هدف کنترلی تنظیم سرعت رتور در محدوده سرعت نامی و ثابت نگه داشتن توان در مقدار نامی آن با کنترلر زاویه پرها می‌باشد [۲].

طراحی سیستم کنترلی برای توربین بادی یک مساله پیچیده است، اولین دلیل اینست که توربین بادی یک سیستم چند ورودی-چند خروجی با پارامترهای به هم پیوسته می‌باشد. از طرف دیگر غیرخطی بودن سیستم و عدم قطعیت‌های موجود در ورودی‌های آن و قیدهای فیزیکی حاکم بر متغیرهای سیستم طراحی یک کنترلر مناسب را مشکل می‌سازد.

کارهای کنترلی انجام شده در حوزه کنترلر توان توربین‌های بادی بسیار گسترده است، بسیاری از مقالات به کنترلر سیستم در ناحیه دوم پرداخته‌اند. در این ناحیه هدف اصلی، کنترلر سرعت می‌باشد و از آنجا که پاسخ زمانی قسمتهای مختلف توربین بادی با یکدیگر متفاوت است این مسأله نیز به دو دسته کنترلر مکانیکی با پاسخ کند

^۱ V_{cut-in}
^۲ V_{rate}

۴) محرک پره‌ها^۷

در مدلسازی سیستم، هر زیر مدل به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود و مدل حاکم بر کل آن با توجه به روابط میان زیرمدل‌ها بدست می‌آید، در ادامه به بررسی هر زیر مدل و بدست آوردن مدل حاکم بر سیستم می‌پردازیم [۱۷].

مدل آیرودینامیکی توربین بادی

توربین بادی دستگاهی است که قابلیت دریافت انرژی از باد و تبدیل آن به انرژی مکانیکی را دارا می‌باشد. انرژی جنبشی موجود در باد با ضریب C_p^A به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.

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

$$T_{aero} = \frac{P_{aero}}{\omega_i} = \frac{c_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad (2)$$

که در این معادلات ρ چگالی متوسط هوا، P_{aero} توان مکانیکی توربین، T_{aero} گشتاور آیرودینامیکی، v سرعت ورودی باد، A سطح جاروب شده پره‌های رتور می‌باشد. ضریب C_p از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم و با محاسبات آیرودینامیکی بدست می‌آید و می‌تواند یک تقریب کلی به شکل زیر برای آن ارائه داد:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \beta^3 - C_6 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda}} \quad (3)$$

که در آن λ^A نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{\omega_i R}{v} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + C_8 \beta} - \frac{C_9}{1 + \beta^3}$$

و ω_i سرعت زاویه ای رتور و R شعاع توربین می‌باشد و ضرایب C_1 تا C_9 با توجه با اطلاعات تولیدکنندگان و ویژگی‌های توربین تعیین می‌شود.

با توجه به روابط مشخص است قدرت مکانیکی توربین بادی به سه عامل سرعت باد، زاویه پره‌ها و سرعت زاویه‌ای رتور بستگی دارد.

مدل قسمت مکانیکی توربین بادی

یکی از روش‌های متداول مدلسازی قسمت مکانیکی توربین بادی سرعت متغیر در نظر گرفتن آن به صورت مدل دوجرمه می‌باشد. در این مدل، یک جرم متعلق به قسمت سرعت پایین (رتور توربین) با اینرسی J_1 و یک جرم متعلق به قسمت سرعت بالا (رتور ژنراتور و گیربکس) با اینرسی J_2 می‌باشد که توسط یک محور قابل ارتجاع با

و کنترل الکتریکی با پاسخ سریع تقسیم می‌شود. خروجی کنترل مکانیکی به عنوان مرجع برای کنترل الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل الکتریکی نیز با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت هدف رسیدن به مرجع را برعهده دارد. در لایه کنترل الکتریکی از انواع کنترلرهای کلاسیک مانند PID و کنترلرهای هوشمند مانند فازی استفاده می‌شود [۳]. روشهای کنترلی در لایه مکانیکی نیز به چند دسته کلی تقسیم می‌شوند، در یک سری از روشها فرض می‌شود که مشخصه های سیستم معلوم است، در این روشها با استفاده از مشخصه توان و گشتاور، مراجع کنترلی بدست می‌آیند [۵]-[۴]. در مقابل روشهایی هستند که مشخصه‌های سیستم را نامعلوم فرض می‌کنند، در این متدها از روشهای جستجو پیک^۸، کنترلر فازی و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود [۸]-[۶]. بسیاری از متدهای کنترلی نیز بر روی کنترل توربین بادی در ناحیه سوم تمرکز کرده‌اند. کنترلرهای مورد استفاده شامل انواع کنترلرهای خطی شده بر مبنای یک نقطه کار مثل PID، LQG و H_∞ [۱۱]-[۹] و کنترلرهای خطی با بهره متغیر^۹ مثل کنترلر fuzzy-PD، کنترلر PID بر مبنای شبکه عصبی [۱۳]-[۱۲] و همچنین انواع کنترلرهای غیرخطی و هوشمند مثل کنترلر حالت لغزشی^۵، کنترلر فازی، انواع شبکه‌های عصبی می‌باشند [۱۶]-[۱۴].

در حقیقت بسیاری از مقالات دو ناحیه کنترلی دوم و سوم را به صورت مجزا مورد بررسی قرار داده‌اند، در واقع این مقالات خاصیت چند ورودی- چند خروجی بودن سیستم را در نظر نگرفته‌اند و سیستم را به صورت دو سیستم تک ورودی- تک خروجی در نظر گرفته‌اند، بنابراین مساله‌ای که مورد توجه قرار می‌گیرد طراحی کنترلی است که در هر دو ناحیه (ناحیه ماکزیمم کردن توان و ثابت نگه داشتن توان حول مقدار نامی) عمل کنترل را انجام داده و خاصیت چند متغیره بودن سیستم را نیز در نظر بگیرد، و همچنین بتوان قیود حاکم بر سیستم را نیز در روند طراحی در نظر گرفت، بنابراین در این مقاله استراتژی کنترل چندمتغیره بر مبنای کنترلر پیش‌بین^۶، برای کنترل توان سیستم توربین بادی سرعت متغیر ارائه شده‌است.

مدل غیرخطی توربین بادی

توربین بادی یک سیستم غیرخطی است و از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌است که معمولاً به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ۱) قسمت آیرودینامیکی
- ۲) قسمت مکانیکی
- ۳) قسمت الکتریکی

^۷ Hill-climbing
^۸ Gain-Scheduling
^۹ Sliding Mode
^۶ Model Predictive Control (MMPC)

^۷ Pitch actuator
^۸ Power coefficient or Betz's factor
^۹ Tip-speed ratio

سازی سیستم بایستی معادله گشتاور آیرودینامیکی (معادله ۲) حول نقطه کار، که توسط سرعت باد تعریف می‌شود، خطی شود، بنابراین داریم:

$$\Delta T_{aero} = \frac{\partial T_{aero}}{\partial \omega_t} \Big|_{op} \Delta \omega_t + \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \Big|_{op} \Delta \beta = a \Delta \omega_t + b \Delta \beta \quad (9)$$

که در آن:

$$a = \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{v^3}{\omega_t} \left[\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} - \frac{C_p}{\lambda} \right] \right) \Big|_{op} \quad (10)$$

$$b = \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{v^3}{\omega_t} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \right) \Big|_{op}$$

و نماد Δ نشان‌دهنده تغییرات حول نقطه کار است. بنابراین توصیف فضای حالت خطی سیستم توربین بادی، (۶)- (۱)، به فرم کلی زیر درمی‌آید:

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x - B \Delta u$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (11)$$

که در آن Δx ، Δu ، Δy به ترتیب تغییرات بردار حالت، بردار ورودی و بردار خروجی را حول نقطه کار نشان می‌دهند و داریم:

$$x = \begin{bmatrix} \omega_t & \omega_{g-Ls} & \beta & T_g & T_{mec} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$u = \begin{bmatrix} \beta^* & T_g^* \end{bmatrix}^T$$

$$y = \begin{bmatrix} \omega_t & p_g \end{bmatrix}^T$$

و

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a}{J_t} & 0 & \frac{b}{J_t} & 0 & \frac{-1}{J_t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-G_g}{J_{g-Ls}} & \frac{1}{J_{g-Ls}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_g} & 0 \\ k + \frac{d.a}{J_t} & -k & \frac{d.b}{j_t} & \frac{d.G_g}{J_{g-Ls}} & -d \left(\frac{1}{J_t} + \frac{1}{j_{g-Ls}} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_\beta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_g T_{g-op} & 0 & G_g \omega_{g-Ls-op} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \text{Zeros}(2,2)$$

ضریب سختی k و ضریب میرایی d به هم متصل شده اند. قسمت مکانیکی با استفاده از معادلات زیر قابل توصیف است.

$$J_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_{aero} - T_{mec} \quad (5)$$

$$J_{g-Ls} \frac{d\omega_{g-Ls}}{dt} = T_{mec} - G_g T_g$$

$$\frac{dT_{mec}}{dt} = k(\omega_t - \omega_{g-Ls}) + d \left(\frac{d\omega_t}{dt} - \frac{d\omega_{g-Ls}}{dt} \right)$$

که در معادلات (۵)، T_{aero} گشتاور آیرودینامیکی، T_{mec} گشتاور محور می‌باشند، و G_g نسبت گیربکس و J_{g-Ls} و ω_{g-Ls} به ترتیب اینرسی و سرعت چرخش ژنراتور با توجه به شفت سرعت پایین می‌باشند.

مدل قسمت الکتریکی - ژنراتور القایی دوسوتغذیه

برای طراحی کنترلر، این مساله حائز اهمیت است که مدل ساده‌ای که دینامیک سیستم را به خوبی نشان دهد، مورداستفاده قرار گیرد. از آنجا که دینامیک زیر سیستم الکتریکی بسیار سریعتر از دینامیک مکانیکی توربین می‌باشد، بنابراین پاسخ دینامیکی ژنراتور به صورت یک مدل مرتبه اول خطی با ثابت زمانی τ_g مدل می‌شود:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{\tau_g} T_g^* - \frac{1}{\tau_g} T_g \quad (6)$$

که در آن T_g^* مقدار مرجع کنترلی برای گشتاور ژنراتور می‌باشد.

محرك پره‌ها

زاویه پره‌ها در سیستم توربین بادی با استفاده از یک محرك الکتریکی یا هیدرولیکی تغییر می‌کنند. مدل ساده‌ای از دینامیک این محرك‌ها با استفاده از مدل مرتبه اول خطی با ثابت زمانی τ_β ارائه شده است:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{\tau_\beta} \beta^* - \frac{1}{\tau_\beta} \beta \quad (7)$$

که در آن β^* سیگنال مرجع برای زاویه پره‌ها می‌باشد. برای پره‌ها محدودیت‌هایی در مقدار و نرخ تغییرات آنها وجود دارد که بایستی در دینامیک آنها در نظر گرفته شود.

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \quad (8)$$

$$\dot{\beta}_{\min} \leq \dot{\beta} \leq \dot{\beta}_{\max}$$

خطی سازی سیستم توربین بادی و توصیف معادلات حالت
غیرخطی بودن سیستم به علت وجود ضریب C_p است که در معادله توان و گشتاور آیرودینامیکی بکاررفته شده‌است، بنابراین برای خطی-

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل سیستم به صورت چند ورودی- چندخروجی^{۱۰} می‌باشد و معادلات خطی‌سازی شده سیستم به نقطه کار وابسته است، بنابراین با تغییر نقطه کار، رفتار سیستم نیز تغییر خواهد کرد.

مساله کنترل توان توربین بادی

از جمله مسائل مطرح کنترلی در زمینه توربین‌های بادی کنترل توان آنها با در نظر گرفتن اهداف خاص کنترلی است.

محدوده کاری توربین بادی به ۴ ناحیه تقسیم می‌شود که در دو ناحیه از این نواحی اهداف کنترلی متفاوتی تعریف می‌شود. این نواحی به صورت زیر دسته بندی می‌شوند.

ناحیه ۱: سرعت باد کمتر از سرعت وصل

ناحیه ۲: سرعت باد بین سرعت وصل و سرعت نامی (بار جزئی)

ناحیه ۳: سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع^{۱۱} (بار کامل)

ناحیه ۴: سرعت باد بیشتر از سرعت قطع

در ناحیه اول و ناحیه چهارم توربین راه اندازی نمی‌شود، چرا که در ناحیه اول، توان تولیدی توربین در مقایسه با تلفات آن کمتر است، و در ناحیه چهارم نیز برای حفاظت توربین توانی تولید نمی‌شود.

در ناحیه دوم سرعت باد بین دو سرعت V_{cut-in} و V_{rate} قرار دارد و هدف اصلی کنترلی در این ناحیه دستیابی به توان ماکزیمم می‌باشد. طبق روابط حاکم بر سیستم، در هر سرعت مشخص باد یک مقدار بهینه برای سرعت رتور وجود دارد که توربین در آن با توان ماکزیمم عمل می‌کند، بنابراین به دنبال بدست آوردن این سرعت رتور بهینه جهت دستیابی به توان بهینه می‌باشیم. با توجه به آنچه گفته شد، هدف کنترلی در ناحیه بار جزئی، دستیابی به توان ماکزیمم با تنظیم سرعت رتور می‌باشد، در حالیکه زاویه چرخشی پره‌ها در مقدار بهینه خود (خیلی نزدیک به صفر) ثابت شده است.

در ناحیه سوم سرعت باد از مقدار نامی فراتر می‌رود بنابراین به خاطر محدودیتهای الکتریکی و کاهش استرس‌های مکانیکی و عدم صدمه زدن به توربین در این ناحیه بایستی توان خروجی را در مقدار نامی آن ثابت نگه داریم. در این ناحیه هدف کنترلی تنظیم سرعت رتور در محدوده سرعت نامی و ثابت نگه داشتن توان در مقدار نامی آن با کنترل زاویه پره‌ها می‌باشد [۲].

استراتژی کنترلی پیشنهادی

در این مقاله استراتژی کنترل چندمتغیره بر مبنای کنترلر پیش‌بین، برای کنترل توان سیستم توربین بادی سرعت متغیر ارائه شده است. ساختار پیشنهادی برای کنترل سیستم در ناحیه دوم و سوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق معادلات حالت ورودی‌های کنترلی

سیستم، زاویه پره‌ها و گشتاور ژنراتور هستند که برای دستیابی به توان ماکزیمم و کاهش بار بروی محور توربین در ناحیه بار جزئی و تولید توانی صاف و بدون نوسان در ناحیه بار کامل تنظیم می‌شوند.

مروری بر کنترل پیش‌بین

کنترل پیش‌بین بر اساس مدل^{۱۲} یکی از پرامتفقط‌ترین تکنیک‌های کنترلی در فعالیتهای صنعتی و زمینه‌های تحقیقاتی به حساب می‌آید. کنترل پیش‌بین، با فراهم آوردن مجموعه‌ای از قوانین کنترلی با استفاده صریح از مدل پروسه و تعیین سیگنال‌های کنترلی با مینیمم کردن یک تابع هدف^{۱۳} تعیین شده، یک مکانیزم کنترلی قابل قبول ارائه می‌دهد. در واقع سه ایده اصلی زیر اساس کنترل پیش‌بین را تشکیل می‌دهند [۱۸]:

۱. استفاده صریح از مدل پروسه برای پیش‌بینی خروجی‌های آینده سیستم در افق پیش‌بینی^{۱۴}
 ۲. محاسبه مجموعه سیگنال‌های کنترلی آینده با مینیمم کردن یک تابع هزینه بر اساس اختلاف بین خروجی‌های آینده سیستم و مقادیر مطلوب (مرجع) تعیین شده.
 ۳. اعمال اولین سیگنال کنترلی بهینه محاسبه شده به سیستم و تکرار کل چرخه پیش‌بینی و بهینه‌سازی در یک قدم جلوتر.
- روش‌های مختلف کنترل پیش‌بین تنها در مدل استفاده شده در بهینه‌سازی با یکدیگر تفاوت دارند. کنترل پیش‌بین نسبت به روش‌های دیگر دارای مزایای متعددی به شرح زیر می‌باشد:

- این کنترل‌کننده را می‌توان جهت کنترل نمودن گروه وسیعی از سیستم‌ها استفاده کرد، از سیستم‌هایی با دینامیک ساده گرفته تا سیستم‌هایی با ساختار پیچیده
- این کنترل‌کننده برای سیستم‌های چندمتغیره به راحتی قابل استفاده است.
- این کنترل‌کننده به منظور در نظر گرفتن قيود سیستم می‌تواند تعمیم پیدا کند.

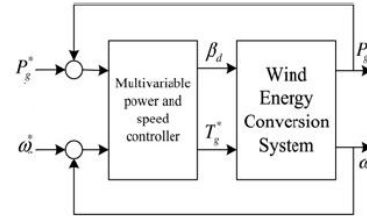
ساختار کنترل پیش‌بین

از آنجا که هدف، کنترل توان در ناحیه دوم و سوم می‌باشد، بایستی از ساختاری استفاده شود که قابلیت دستیابی به اهداف متفاوت کنترلی را فراهم سازد. در این مقاله ساختار کنترل چندمتغیره بر مبنای کنترل پیش‌بین پیشنهاد شده است. این ساختار در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ساختار در هر ناحیه کنترلی، سیستم حول نقطه کاری مناسب خطی‌سازی می‌شود، سپس به منظور کنترل توان برای هر سیستم خطی شده، با توجه به اهداف کنترلی، کنترلر پیش‌بین مناسب طراحی می‌گردد. پس از آن با یک معیار مناسب بین کنترلرهای مختلف سونیچینگ صورت پذیرد تا سیستم

^{۱۲} Model based Predictive Control (MPC)
^{۱۳} Objective Function
^{۱۴} Prediction Horizon

^{۱۰} Multi Input-Multi Output (MIMO)
^{۱۱} $V_{cut-out}$

در تمام نقاط کاری عملکرد مطلوبی داشته باشد. اجزای اصلی کنترل پیش‌بین شامل مدل سیستم، حل مساله بهینه‌سازی و معیاری برای سوئیچینگ میان کنترلرهای مختلف می‌باشد، که در ادامه به تفسیر هر قسمت می‌پردازیم.



شکل ۱: ساختار کنترلی توربین بادی به صورت کنترل چندمتغیره

یک توصیف متداول بیان چنین تابع هدفی به فرم زیر می‌باشد:

$$J(N_p, N_c) = \sum_{j=1}^{N_p} Q[y_m(k+j|k) - y^*(k+j)]^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} R[\Delta u(k+j)]^2 \quad (16)$$

در رابطه فوق N_p بیان کننده افق پیش‌بینی و N_c افق کنترلی می‌باشد، که لزوماً منطبق بر N_p نخواهد بود. y^* مقدار مطلوب خروجی است و Q و R نیز ماتریس‌های وزنی تابع هزینه می‌باشند، از این ماتریس‌ها برای کنترل دقیق‌تر یک متغیر خروجی خاص در میان خروجی‌های متعدد یک سیستم استفاده می‌شود که این کار با افزایش ضریب مربوط به سیگنال موردنظر انجام می‌گیرد. انتخاب این ماتریس‌ها یکی از مسائل مهم در طراحی کنترلی پیش‌بین می‌باشد. مساله دیگری که معمولاً در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود قیود سیستم است. برای طراحی کنترلی بایستی محدودیت‌های سیستم توربین بادی از جمله محدودیت در مقدار زاویه پرها و میزان تغییرات آن، مقدار توان تولیدی و سرعت توربین را نیز در نظر گرفت [۲۰]-[۱۹].

سوئیچینگ بین کنترلرهای مختلف

برای انتخاب کنترلی در هر لحظه بایستی از یک معیار مناسب جهت سوئیچینگ استفاده شود. این معیار می‌تواند، سرعت رتور یا ژنراتور، توان تولیدی و یا مقدار متوسط باد باشد، که اندازه‌گیری یا تخمین زده شده‌اند.

شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی ساختار کنترلی پیشنهاد شده برای یک توربین 2MW با مشخصات مندرج در جدول (۱) آورده شده است. سیستم مورد نظر حول دو نقطه کار خطی شده‌است، در یک نقطه کار، سرعت باد کمتر از سرعت نامی (ناحیه دوم کنترلی) و در دیگری سرعت باد بیشتر از مقدار نامی (ناحیه سوم کنترلی) می‌باشد. سپس برای هر سیستم خطی کنترلی مناسب با توجه به اهداف کنترلی، طراحی می‌شود.

در تمام شبیه‌سازی‌ها، کنترلی طراحی شده بر روی سیستم غیرخطی و برای سرعت‌های مختلف باد تست شده‌است. سیگنال معیار برای سوئیچینگ بین دو کنترلی نیز سرعت متوسط باد می‌باشد. همچنین نتایج با کنترلی PID با ساختار تک ورودی- تک خروجی، نشان داده شده در شکل (۲) مقایسه شده‌است.

مدل سیستم مورد استفاده برای کنترل پیش‌بین برای طراحی کنترلی پیش‌بین اولین قدم انتخاب مدلی مناسب، با توجه به ماهیت مساله می‌باشد. از آنجا که سیستم توربین بادی یک سیستم چند ورودی- چند خروجی است، و در نظر گرفتن ماهیت چند متغیره بودن سیستم باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود، از توصیف فضای حالت سیستم به فرم معادلات (۱۴) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_u u(k) + B_d d(k) \\ y(k) &= Cx(k) + D_d d(k) \end{aligned} \quad (14)$$

که در این معادلات، $x(k)$ بردار حالت، $u(k)$ ورودی‌های کنترلی، $d(k)$ اغتشاش غیرقابل اندازه‌گیری، $y(k)$ نیز خروجی‌های قابل اندازه‌گیری سیستم می‌باشند و ماتریس‌های A, B, C, D در معادله (۱۴) تعریف شده‌اند، در این معادلات $d(k)$ اغتشاش خروجی و ورودی را مدل می‌کند و به صورت زیر مدل می‌شود:

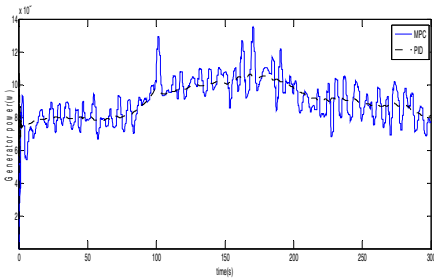
$$\begin{aligned} x_d(k+1) &= \bar{A} x_d(k) + \bar{B} n_d(k) \\ d(k) &= \bar{C} x_d(k) + \bar{D} n_d(k) \end{aligned} \quad (15)$$

که در این معادلات n_d نویز سفید گوسی می‌باشد.

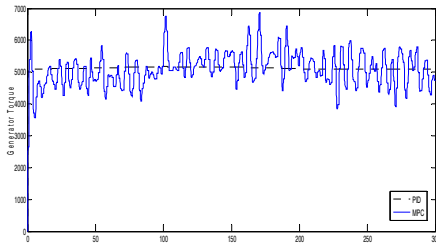
علاوه بر این بایستی توجه شود که روابط حاکم بر کنترلی پیش‌بین برای سیستم منفصل زمانی بیان شده و چون سیستم توربین بادی که با معادلات (۱۳) بیان شده پیوسته زمانی است، بایستی ابتدا با زمان نمونه‌برداری مناسب گسسته شود.

مساله بهینه‌سازی

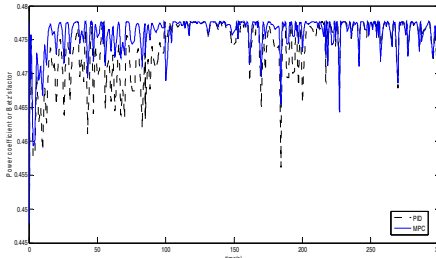
تابع هزینه معمولاً بر این اساس انتخاب می‌شود که خروجی‌های آینده در افق پیش‌بینی، سیگنال مرجع تعیین شده را دنبال نموده و همزمان تلاش کنترلی لازم برای این کار تا حد امکان کم باشد.



شکل ۵: توان خروجی ژنراتور



شکل ۶: گشتاور ژنراتور



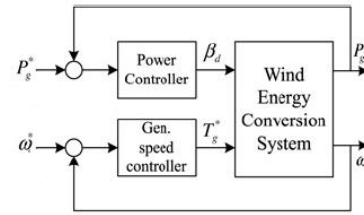
شکل ۷: ضریب توان (C_p)

برای مقایسه عملکرد کنترلر پیش‌بین و کنترلر PID، در این ناحیه، متوسط توان تولیدی بر مبنای هر کنترلر و همچنین انحراف معیار λ از مقدار بهینه آن، در جدول (۲) آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، توان متوسط ژنراتور با استفاده از کنترلر پیش‌بین از کنترلر PID بیشتر بوده و انحراف معیار λ از مقدار بهینه آن کمتر است، که هر دو این موارد نشان‌دهنده عملکرد بهتر کنترلر پیش‌بین می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات ناحیه دوم کنترلی

کنترلر	معیار
کنترلر PID	مقدار متوسط توان ژنراتور (MW)
کنترلر MPC	انحراف معیار λ
0.8999	0.92
0.7186	0.4820

برای بررسی عملکرد کنترلر در ناحیه بار کامل، سرعت بادی مطابق شکل (۸) به سیستم اعمال می‌کنیم. نتایج حاصل از شبیه-سازیها در شکل‌های (۷) - (۴) نشان داده شده‌است.



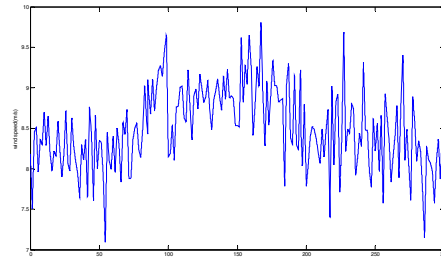
شکل ۲: ساختار کنترلی توربین بادی به صورت کنترل مجزا

جدول ۱: مشخصات توربین بادی مورد مطالعه

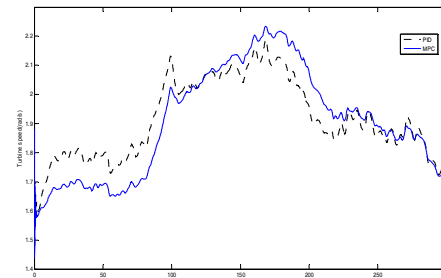
مقدار	پارامتر
40 m	شعاع توربین (R)
2 MW	توان نامی توربین (P_{nom})
2.47 rad/s	سرعت نامی رتور توربین
0.4775	ضریب توان بهینه (C_{p-nom})
9	مقدار λ بهینه (λ_{opt})
11 m/s	سرعت باد نامی

نتایج

ابتدا عملکرد سیستم را در ناحیه بار جزئی با در نظر گرفتن سرعت باد مطابق شکل (۳) مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج حاصل از شبیه-سازیها در شکل‌های (۷) - (۴) نشان داده شده‌است.



شکل ۳: سرعت باد (کمتر از مقدار نامی)



شکل ۴: سرعت رتور توربین

سازی‌ها در شکل‌های (۹)–(۱۲) نشان داده شده‌است.

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است، هنگامی که از کنترلر پیش‌بین استفاده می‌شود، نوسانات سرعت رتور و توان ژنراتور، حول مقدار نامی، در مقایسه با کنترلر PID کاهش می‌یابد. علاوه بر آن با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که مقدار زاویه پرها و میزان تغییرات آنها، در MPC کمتر از PID می‌باشد، که تمامی این مسائل نشان‌دهنده عملکرد بهتر کنترلر پیش‌بین در ناحیه سوم کنترلی می‌باشد. در جدول ۳ نیز انحراف معیار توان و سرعت رتور از مقدار نامی برای هر دو کنترلر محاسبه شده‌است، که در هر دو مورد این مقادیر برای کنترلر پیش‌بین کاهش یافته است.

جدول ۳: مشخصات ناحیه سوم کنترلی

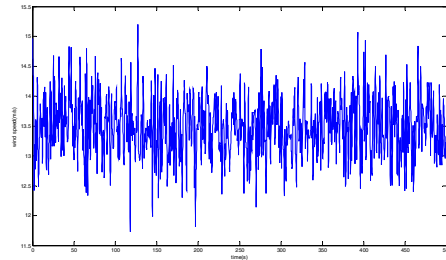
کنترلر	معیار	کنترلر
کنترلر PID	انحراف معیار توان ژنراتور	کنترلر MPC
0.1193		0.0838
0.1143	انحراف معیار سرعت رتور	0.04

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

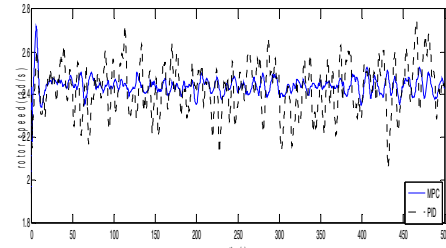
در این مقاله کنترل چندمتغیره بر مبنای تکنیک‌های کنترل پیش‌بین، برای کنترل توان توربین بادی سرعت متغیر در دو ناحیه دوم و سوم کنترلی ارائه شد. این کنترلر با تنظیم ورودی‌های کنترلی (گشتاور ژنراتور و زاویه پرها)، و در نظر گرفتن قیود فیزیکی حاکم بر سیستم، باعث ماکزیمم کردن توان خروجی و کاهش بارهای آیرودینامیکی روی محور در ناحیه دوم کنترلی می‌شود، و همچنین در ناحیه بار کامل توان ژنراتور و سرعت رتور را حول مقدار نامی آن ثابت نگه می‌دارد، در حالیکه که فعالیت محرک پرها را نیز کاهش می‌دهد. در حقیقت این کنترلر با در نظر گرفتن چندمتغیره بودن ماهیت سیستم و قیود حاکم بر آن سعی در بهبود عملکرد سیستم دارد. در نهایت نیز عملکرد کنترلر پیشنهادی با کنترلر کلاسیک PID، که سیستم را به صورت دو سیستم تک ورودی- تک خروجی مجزا، در نظر می‌گیرند، مقایسه شده‌است، که نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر ساختار کنترل پیش‌بین چندمتغیره می‌باشد.

مراجع

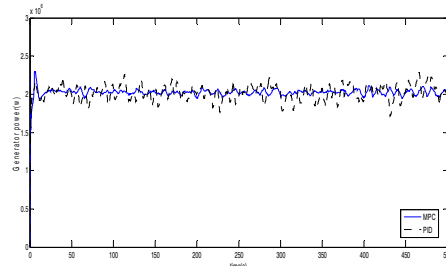
- [1] Lucy Y. Pao and Kathryn E. Johnson, 2009. "A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms". American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA. June 10-12, 2009.
- [2] Andre s Peterson, 2005. "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines". PhD Thesis, Division of Electric



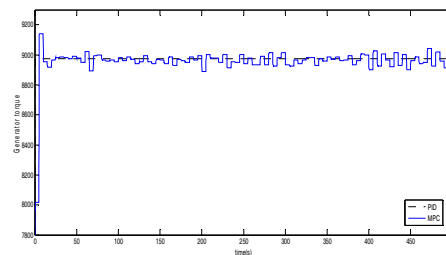
شکل ۸: سرعت باد (بیشتر از مقدار نامی)



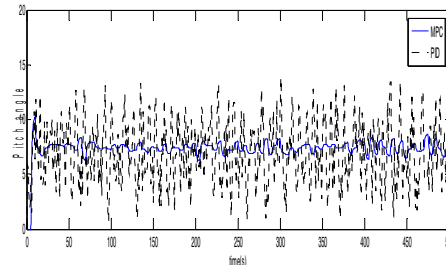
شکل ۹: سرعت رتور توربین



شکل ۱۰: توان خروجی ژنراتور



شکل ۱۱: گشتاور ژنراتور



شکل ۱۲: زاویه پرها

- [11] Ryosei Sakamoto, Tomonobu Senjyu, Toshiaki Kaneko, Naomitsu Urasaki, 2006. "Output Power Leveling of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using H_{∞} Control". Power Systems Conference and Exposition, IEEE.
- [12] Lei Zhang, Haidong Li, Chunliang E, Jianlin Li, Honghua Xu, 2008. "Pitch Control of Large Scale Wind Turbine Based on Fuzzy-PD Method". Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, IEEE.
- [13] Zuoxia Xing, Qinwei Li, Xianbin Su, Hengyi Guo, 2009. "Application of BP Neural Network for Wind Turbines". Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE.
- [14] Lei Zhang, Chunliang E, Haidong Li, Honghua Xu, 2009. "A New Pitch Control Strategy for Wind Turbines Base on Quasi-Sliding Mode Control". Power Generation and Supply, IEEE.
- [15] AMÈNDOLA, GONZAGA, 2007. "Fuzzy-Logic Control System of a Variable-Speed Variable-Pitch Wind-Turbine and a Double-Fed Induction Generator". Intelligent Systems Design and Applications, IEEE.
- [16] Xiyun Yang, Lingfeng Xu and Yibing Liu, 2006. "Large Variable Speed Wind Turbine Control with Elman Controller". Intelligent Systems Design and Applications, IEEE.
- [17] Nadhira Khezami, Naceur Benhadj Braiek Xavier Guillaud, 2010. "Wind turbine power tracking using an improved multimodel quadratic approach". ISA Transactions 49, 326_334.
- [18] Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons, 1999. "Model Predictive Control", Springer.
- [19] M. Soliman, O.P. Malik, D.T. Westwick, 2011. "Multiple Model Predictive Control for Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators". IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, NO. 3.
- [20] A. Bemporad, M. Morari and N.L. Ricker, 2005. "Model Predictive Control Toolbox, for Use with MATLAB". The Mathworks.
- Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- [3] Adrià Junyent-Ferré, Oriol Gomis-Bellmunt, Andreas Sumper, Marc Sala, Montserrat Mata, 2010. "Modeling and Control of the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine". Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier.
- [4] A. Mirecki, X. Roboam, F. Richardeau, 2004. "Comparative Study of Maximum Power Strategy in Wind Turbines". Industrial Electronics, IEEE.
- [5] Yazhou Lei, Alan Mullane, Gordon Lightbody, and Robert Yacamini, 2006. "Modeling of the Wind Turbine with a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 1.
- [6] Quincy Wang, and Liuchen Chang, 2004. "An Intelligent Maximum Power Extraction Algorithm for Inverter-Based Variable Speed Wind Turbine Systems". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5.
- [7] Xingjia Yao, Changchun Guo and Zuoxia Xing, Yan Li, Shu Liu, 2009. "Variable Speed Wind Turbine Maximum Power Extraction Based on Fuzzy Logic Control". Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IEEE.
- [8] Xu Yang, Xiang Gong, Wei Qiao, 2010. "Mechanical Sensorless Maximum Power Tracking Control for Direct-Drive PMSG Wind Turbines". Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE.
- [9] N. Horiuchi, T. Kawahito, 2001. "Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator Power Control". Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE.
- [10] Xingjia Yao, Changchun Guo and Zuoxia Xing, Yan Li, Shu Liu and Xiaodong Wang, 2009. "Pitch Regulated LQG Controller Design for Variable Speed Wind Turbine". International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE.