

روش جدید برای استحصال حداکثر توان از سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه با کنترل مد لغزشی

کریم عباسزاده^{۱*}، دانشیار، سام روزبهانی^۲، کارشناس ارشد

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

abbaszadeh@eed.kntu.ac.ir

^۲ گروه پژوهشی ماشین و محرکه الکتریکی - جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

samroozbehani@jdnasir.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۲۵ اصلاحیه: ۹۰/۷/۷

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۱۵

چکیده: هدف اصلی این مقاله، ارائه یک روش جدید برای کنترل مستقیم توان سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه برای ردیابی حداکثر توان قابل جذب در سرعت‌های مختلف باد است. به منظور پیاده‌سازی روش جدید کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو و به دست آوردن حداکثر توان از توربین بادی از روش ترکیبی خطی‌سازی ورودی خروجی و کنترلر غیرخطی مد لغزشی استفاده شده است. به طوری که سیگنال‌های کنترلی به بلوک مدولاسیون بردار فضایی ارسال می‌شوند. در نتیجه استفاده از این بلوک، سوئیچینگ مبدل سمت روتور با فرکانس ثابت، طوری صورت می‌پذیرد که ولتاژ سه فاز با فرکانس و دامنه مطلوب به سیم‌پیچی‌های روتور تزریق شود. برای تعیین حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی در هر لحظه، از روش مرسوم جدول نظاره و روش جدید بلادرنگ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بر روی توربین ۶۶۰ Kw نشان می‌دهد که روش بلادرنگ نسبت به روش جدول نظاره از خطای کمتر و مقاومت بهتر جهت ردیابی حداکثر توان در شرایط تغییر پارامترهای ماشین برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، ژنراتور القایی دوگانه تغذیه، حداکثر توان، کنترلر مد لغزشی.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر رشد چشم‌گیری داشته است. در مجموعه انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد از سال ۱۹۹۱ به بعد مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی در سال ۲۰۰۷ برابر با ۸۰۰۰ مگاوات بوده، در حالی که این ظرفیت در پایان سال ۲۰۱۰ به ۱۵۲۰۰۰ مگاوات رسیده است. هدف از بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی، کم کردن هزینه‌های مربوط به تولید انرژی الکتریکی و کاهش آلودگی محیط زیست است [۱].

یکی از مشکلاتی که به طور معمول در مورد توربین‌های بادی مطرح می‌شود، تولید حداکثر توان الکتریکی به ازای سرعت‌های مختلف باد است. توربین‌های بادی در حالت کلی به دو گروه سرعت متغیر و سرعت ثابت تقسیم می‌شوند. ژنراتور توربین‌های بادی سرعت ثابت، ژنراتور القایی قفسه سنجابی است که به طور مستقیم به شبکه الکتریکی متصل می‌شود. در این نوع توربین‌ها، سرعت ژنراتور توسط ادوات مکانیکی تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود و هیچ‌گونه کنترل الکتریکی در آن‌ها وجود ندارد. در توربین‌های بادی سرعت ثابت فقط در یک سرعت باد، امکان تولید توان حداکثر وجود دارد. استفاده از کنترل‌کننده‌های مکانیکی در این نوع توربین‌ها باعث کند بودن و کاهش عمر آن‌ها شده است [۲].

گروه دوم، توربین‌های بادی سرعت متغیرند. ژنراتوری که عموماً در توربین‌های بادی سرعت متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، ژنراتور القایی دوگانه تغذیه است. ژنراتور القایی دوگانه تغذیه در واقع همان ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده‌ای است که استاتور آن مستقیماً به شبکه الکتریکی متصل است و روتور آن از طریق دو مبدل الکترونیک قدرت پشت سرهم، به شبکه وصل می‌باشد.

سیستم‌های توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه دارای مزایای زیرند:

- در نتیجه ثابت بودن فرکانس الکتریکی شبکه و تنظیم فرکانس الکتریکی روتور، امکان کنترل سرعت مکانیکی و جذب حداکثر توان از توربین بادی وجود دارد.
- استهلاک ادوات مکانیکی سیستم کاهش می‌یابد.
- توان نامی مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد استفاده در توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه کوچک است.
- اگر ژنراتور در مد فوق سنکرون کار کند، روتور به شبکه توان الکتریکی تزریق می‌کند و در نتیجه مبدل سمت روتور^۱ عملکرد

یکسوسازی و مبدل سمت شبکه^۲ عملکرد اینورتری خواهد داشت. همچنین اگر ژنراتور در مد زیر سنکرون عمل کند، روتور از شبکه توان الکتریکی جذب شده و در نتیجه مبدل سمت شبکه، عملکرد یکسوسازی و مبدل سمت روتور، عملکرد اینورتری خواهد داشت. وظیفه مبدل سمت شبکه، کنترل ولتاژ dc خازن است. از طرفی دیگر وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان اکتیو و راکتیو ماشین است [۳].

با اعمال کنترل‌برداری در مبدل سمت روتور در راستای شار استاتور، توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل کنترل می‌شود. در [۴] و [۵] برای پیاده‌سازی کنترل برداری ژنراتور القایی دوگانه تغذیه از کنترلرهای PI استفاده شده است. عیب اصلی کنترلر PI مقاوم نبودن آن در شرایط تغییر جزئی پارامترهای سیستم است. در [۶] از کنترلر شبکه عصبی برای این امر استفاده شده است، اما لزوم جداسازی مؤلفه‌های dq جریان روتور از معایب آن محسوب می‌شود. با توجه به این موضوع، روش کنترل مستقیم^۳ توان پیشنهاد شده است.

روش کنترل مستقیم توان ژنراتور القایی دوگانه تغذیه، از روش کنترل مستقیم شار و گشتاور موتورهای القایی نتیجه شده است [۷] و [۸]. در [۹] و [۱۰] از روش کنترل مستقیم توان برای کنترل توان‌های ژنراتور استفاده شده است. در این مراجع، ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به ترتیب با توان‌های مرجع مربوط مقایسه، و خطای آن‌ها به کنترلرهای هیستریزس تزریق می‌شوند. نهایتاً بر اساس خروجی کنترلر هیستریزس و موقعیت شار استاتور یا روتور و با توجه به جدول سوئیچینگ از پیش تعیین شده، سوئیچینگ مبدل الکترونیک قدرت سمت روتور صورت می‌پذیرد. فرکانس سوئیچینگ در این روش متغیر است، به طوری که این موضوع باعث افزایش هزینه مربوط به ادوات الکترونیک قدرت مبدل می‌شود. از دیگر معایب این روش، آن است که هارمونیک‌های زیادی در نتیجه پیاده‌سازی آن تولید می‌شود. از طرفی برای جلوگیری از رخ دادن رزونانس، استفاده از فیلتر هم محدودیت دارد.

کنترل ساختار متغیر یا همان کنترل مد لغزشی^۴ برای سیستم‌های غیرخطی و سیستم‌هایی همچون سیستم توربین بادی که در آن نامعینی وجود دارد، مناسب است. پیاده‌سازی ساده، مقاومت بالا و پاسخ سریع از مزایای آن است. کاربرد کنترل ساختار متغیر جهت درایو ماشین‌های الکتریکی در [۱۱] آورده شده است. در [۱۲-۱۴] از کنترل‌کننده مد لغزشی برای کنترل توان‌های ژنراتور القایی دوگانه تغذیه در

2. Grid Side Converter (GSC)

3. Direct Power Control (DPC)

4. Sliding Mode Control (SMC)

1. Rotor Side Converter (RSC)

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

به طوری که:

$$\lambda = \frac{R\omega_f}{v} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، P_M توان مکانیکی خروجی توربین بادی و واحد آن وات، ρ چگالی هوا (به طور معمول 1.225 Kg/m^3)، R شعاع پره‌ها واحد آن [m]، V سرعت باد واحد آن [m/s]، $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب توان، β زاویه گام پره‌ها، ω_f سرعت زاویه‌ای توربین و λ نسبت سرعت نوک پره‌هاست [۴]. توضیحات لازم دربارهٔ به $C_p(\lambda, \beta)$ در بخش ۳ آورده شده است.

۲.۲. مدل جعبه دنده و ژنراتور القایی دوگانه تغذیه

تقریباً تمامی توربین‌های بادی توان بالا برای افزایش سرعت دورانی در سمت ژنراتور، مجهز به جعبه دنده‌اند. جعبه دنده از طریق شفت به توربین و ژنراتور متصل است. مدل فضای حالت ژنراتور القایی دوگانه تغذیه در طرف شفت سرعت بالا در قاب مرجع سنکرون شار استاتور به صورت زیر است [۳ و ۱۸]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}u_r + \mathbf{d}u_s + \mathbf{e}T_L \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [i_{sq} \quad i_{sd} \quad i_{rq} \quad i_{rd} \quad \omega_m]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_s = [u_{sd} \quad u_{sq}]^T; \mathbf{u}_r = [u_{rd} \quad u_{rq}]^T \quad (5)$$

$$T_L = \frac{T_{wtr}}{K^2 \text{ gear}} \quad (6)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_4 + a_{24}x_3 + a_{25}x_1 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_3 + a_{33}x_4 + a_{34}x_4 + a_{35}x_2 \\ a_{41}x_2 + a_{42}x_3 + a_{43}x_4 + a_{44}x_3 + a_{45}x_1 \\ a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به رابطه‌های (۳) و (۴) این سیستم دارای پنج متغیر حالت است. این متغیرها شامل مؤلفه‌های جریان استاتور، روتور و سرعت ژنراتور هستند، به طوری که مؤلفه‌های ولتاژ روتور $[u_{rd} \quad u_{rq}]$ در آن، ورودی‌های کنترلی محسوب می‌شوند. همچنین T_L ، T_{wtr} و K_{gear} در رابطه (۶) به ترتیب، معرف گشتاور آیرودینامیکی توربین، گشتاور ژنراتور و نسبت تبدیل چرخ دنده‌اند. نهایتاً مؤلفه‌های ولتاژ استاتور $[u_{sd} \quad u_{sq}]$ و گشتاور در این سیستم، ورودی‌های غیرقابل کنترل محسوب می‌شوند. رابطه (۷) شامل ماتریس $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ است. این ماتریس دارای پنج معادله غیرخطی وابسته به متغیرهای حالت است که ضرایب درایه‌های آن در پیوست آورده شده است. همچنین سایر ماتریس‌های

توربین‌های بادی و آبی استفاده شده است. عیب اصلی در این مراجع، لزوم جداسازی مؤلفه‌های جریان روتور برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو است. در [۱۵-۱۷] این مسئله با استفاده از روش کنترل مستقیم توان و به کارگیری کنترلر مد لغزشی حل شده است. استراتژی کنترل در [۱۵-۱۷] بدین طریق است که ژنراتور القایی دوگانه تغذیه باید در هر لحظه، حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی را ردیابی کند. یکی از معایب این مراجع، استفاده از جدول نظاره برای تعیین مقدار حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی در آن‌هاست. تنظیم جدول نظاره برای تولید توان مرجع به ازای سرعت‌های مختلف باد زمان‌بر است. همچنین به سبب فرسوده شدن سیستم‌های مکانیکی در طول زمان، جدول نظاره نیز باید با در نظر گرفتن این نامعینی‌های جدید دوباره تنظیم شود.

در مقاله حاضر، یک روش جدید برای کنترل مستقیم توان ژنراتور القایی دوگانه تغذیه با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی پیشنهاد می‌شود. برای پیاده‌سازی این روش، نیازی به جداسازی مؤلفه‌های جریان روتور نیست. از دیگر ویژگی‌های این روش، ثابت بودن فرکانس سوچینگ مبدل الکترونیک قدرت آن، و مقاوم بودن کنترلر آن در شرایط تغییر پارامترهای ژنراتور است. همچنین، برای تعیین حداکثر توان قابل جذب به ازای سرعت‌های مختلف باد از یک الگوریتم جدید استفاده شده است که از جمله ویژگی‌های آن، می‌توان به بلادرنگ بودن و استقلال آن نسبت به پارامترهای سیستم مکانیکی اشاره کرد.

در بخش ۲ ابتدا مدل دینامیکی سیستم توربین بادی مجهز به چرخ دنده و ژنراتور القایی دوگانه تغذیه استخراج شده است. در بخش ۳ دو روش برای تعیین حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی به ازای مقادیر مختلف سرعت باد، معرفی شده است. در بخش ۴ طراحی کنترل غیرخطی مد لغزشی انجام، و نهایتاً در بخش ۵ شبیه‌سازی نتایج توسط نرم‌افزار *MATLAB/Simulink* ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی توربین بادی

۲.۱. مدل قسمت آیرودینامیکی توربین بادی

توربین بادی، سیستمی است دارای تعدادی پره که به وسیله آن‌ها انرژی را از باد دریافت، و آن را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. مقدار انرژی که باد به پره‌های روتور انتقال می‌دهد، به چگالی هوا، مساحت جاروب شده توسط پره‌ها و مکعب سرعت باد بستگی دارد، لذا توان مکانیکی خروجی توربین بادی به صورت رابطه (۱) است:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{3}{2} u_{sd} x_1 = \left(\frac{400\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) (x_1) \\ y_2 = \frac{3}{2} u_{sd} x_2 = \left(\frac{400\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) (x_2) \end{cases} \quad (15)$$

با توجه به رابطه (۱۵) و برقراری شرط رابطه (۱۳) توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت مستقل قابل کنترل‌اند.

۳. تعیین حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی

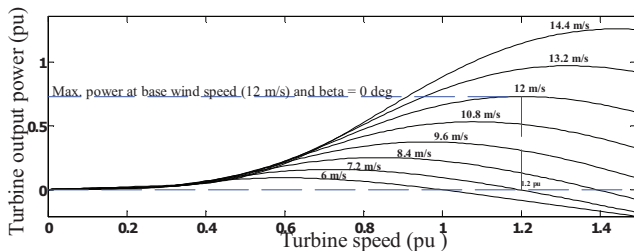
در این مقاله، برای تعیین حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی از روش مرسوم جدول نظاره و روش پیشنهادی بلادرنگ استفاده شده است. در ادامه به تشریح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱.۳. استفاده از جدول نظاره

در شکل (۱) مشخصه توان مکانیکی توربین بادی مفروض این مقاله، به صورت تابعی از سرعت دورانی توربین و به ازای مقادیر مختلف سرعت باد آورده شده است. این مشخصه برای هر توربین متفاوت است. در روش جدول نظاره با در نظر گرفتن نقاط اکسترمم مشخصه شکل (۱)، حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی به ازای مقادیر مختلف سرعت باد و سرعت توربین در یک جدول تنظیم شده است [۴].

۲.۳. روش پیشنهادی برای تعیین حداکثر توان قابل جذب به صورت بلادرنگ

انرژی مکانیکی قابل جذب از توربین بادی به ازای مقادیر مختلف سرعت باد با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود. در این رابطه، فاکتوری به نام ضریب توان وجود دارد که با $C_p(\lambda, \beta)$ نشان داده می‌شود. ضریب توان، تابعی از زاویه پیشش (β) و نسبت سرعت خطی نوک پرها به سرعت باد (λ) است. $C_p(\lambda, \beta)$ به صورت نمودار توسط سازندگان ارائه می‌شود. اطلاعات تولیدکنندگان نشان می‌دهد که نمودار توان توربین‌های بادی مشابه‌اند. در [۱۹] یک تقریب کلی برای $C_p(\lambda, \beta)$ به صورت رابطه (۱۶) ارائه شده است:



شکل (۱): مشخصه سرعت و توان مکانیکی توربین بادی به ازای مقادیر مختلف سرعت باد [۱۹]

رابطه (۳) با فرض رابطه (۸)، در رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) آورده شده است:

$$K = \frac{1}{1 - \frac{M^2}{L_s L_r}}, M = L_m \quad (8)$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{M}{L_s L_r} k \\ -\frac{M}{L_s L_r} k & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} k \\ \frac{1}{L_r} k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_s} k \\ \frac{1}{L_s} k & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_s L_r} k \\ -\frac{M}{L_s L_r} k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (10) \text{ و } (11)$$

در این رابطه‌ها M, L_s, L_r به ترتیب، معرف اندوکتانس متقابل، اندوکتانس استاتور و اندوکتانس روتور می‌باشند. با توجه به اتصال توربین بادی به شین بی‌نهایت، ولتاژ و شار استاتور را می‌توان ثابت فرض کرد. حال اگر مقاومت استاتور و مؤلفه d شار استاتور در قاب سنکرون صفر فرض شوند، رابطه‌های زیر را خواهیم داشت:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \xrightarrow{R_s \approx 0} u_s \approx \frac{d\lambda_s}{dt}, \quad u_s \approx j\omega_s \lambda_s \quad (12)$$

$$\lambda_s = \lambda_q; \lambda_d = 0; \frac{d\lambda_d}{dt} = 0 \Rightarrow u_{sq} = 0 \quad (13)$$

در این حالت، توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور (خروجی‌های سیستم) به صورت رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$y = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{sd} & u_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_1 \\ x_2 & x_2 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} P_s & Q_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

بنابراین با جاگذاری مقدار ولتاژ نامی استاتور از بخش ضمیمه، رابطه عددی توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۱۵) نتیجه می‌شود:

$$\begin{cases} P_{ref} = P_{nref} - P_r \\ Q_{ref} = Q_{nref} - Q_r \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، P_{ref} و Q_{ref} توان‌های مرجع استاتور است (در این مقاله Q_{ref} به صورت کسری از P_{ref} در نظر گرفته شده) و توان‌های خروجی استاتور به ازای مقادیر مختلف سرعت باد، باید این مقادیر را ردیابی کنند. همچنین P_r و Q_r بیانگر توان‌های اکتیو و راکتیو سیم‌پیچی‌های روتور هستند که از رابطه (۲۱) نتیجه می‌شوند:

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2}[u_{rd}i_{rd} + u_{rq}i_{rq}] \\ Q_r = \frac{3}{2}[u_{rq}i_{rd} - u_{rd}i_{rq}] \end{cases} \quad (21)$$

۴. طراحی کنترلر پیشنهادی برای کنترل مستقیم سیستم توربین بادی

هدف این بخش، طراحی کنترلری است که با پیاده‌سازی آن استاتور قابلیت ردیابی توان‌های Q_{ref} و P_{ref} را داشته باشد. در این راستا، ابتدا با استفاده از روش خطی‌سازی ورودی و خروجی، یک رابطه مستقیم بین ورودی و خروجی سیستم ایجاد می‌شود، سپس کنترلر مد لغزشی برای آن طراحی می‌شود. با توجه به تعریف مشتق لی [۲۰] و رابطه (۱۵) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= \frac{\partial h}{\partial x_1}(\dot{x}_1) = \frac{\partial h}{\partial x}(f(x_1) + (g_{11} + g_{12})u_r + (d_{11} + d_{12})u_s + e_{11}T_L) \\ &= L_f h(x_1) + L_{g12} h(x_1) u_{rq} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 &= \frac{\partial h}{\partial x_1}(\dot{x}_2) = \frac{\partial h}{\partial x}(f(x_2) + (g_{21} + g_{22})u_r + (d_{21} + d_{22})u_s + e_{21}T_L) \\ &= L_f h(x_2) + L_{g21} h(x_2) u_{rd} + L_{d21} h(x_2) u_{sd} \end{aligned} \quad (23)$$

رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) به صورت رابطه ماتریسی (۲۴) قابل بازنویسی است:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f h(x_1) \\ L_f h(x_2) \end{bmatrix} + G_r \begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} + D_s \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، رابطه‌های (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) مفروضه‌اند:

$$L_f h(x_1) = (489.9)(a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_2x_5 + a_{15}x_4x_5) \quad (25)$$

$$L_f h(x_2) = (489.9)(a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_4 + a_{24}x_3x_5 + a_{25}x_1x_5) \quad (26)$$

$$G_r = \begin{bmatrix} 0 & L_{g12}h(x_1) \\ L_{g21}h(x_2) & 0 \end{bmatrix}, \quad D_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_{d21}h(x_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

همچنین در نتیجه تعریف رابطه (۲۸) داریم:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4 \right) \exp(-C_5 / \lambda_i) + C_6\lambda \quad (16)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{(\lambda + C_7\beta)} - \frac{C_8}{(\beta^3 + 1)} \right)^{-1}$$

پارامترهای C_1 تا C_8 برای هر توربین بادی متفاوت است. این پارامترها در کاتالوگ هر توربین توسط سازندگان مشخص می‌شود. پارامترهای توربین مفروض این مقاله در جدول (۲) بخش ضمیمه آورده شده است. با توجه به این جدول، ضریب توان در مدل آیرودینامیکی توربین بادی مفروض به صورت رابطه (۱۷) نتیجه می‌شود:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda \quad (17)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0/035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۷) نسبت به λ ، بیشینه مقدار $C_p(\lambda, \beta)$ به ازای زاویه گام پره صفر ($\beta = 0$) مشخص می‌شود:

$$C_p(\lambda, \beta)_{\max} = \text{Max}\left(110/23 \left(\frac{1}{\lambda} - 0/11976\right) \cdot \exp\left(-21 \left(\frac{1}{\lambda_i} - 0/0031\right)\right)\right) \quad (18)$$

$$\lambda \geq 0 \rightarrow C_p(\lambda, \beta)_{\max} = 0/48 \rightarrow \lambda_{opt} = 8/1$$

تعیین حداکثر توان قابل جذب (P_{nref}) به صورت بلادرنگ این‌گونه است که در هر لحظه، مقدار λ توربین بادی اندازه‌گیری می‌شود. اگر λ برابر با $8/1$ باشد، شبکه الکتریکی بیشترین توان را از توربین دریافت می‌کند، ولی اگر کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر از $8/1$ باشد، باید مقدار توان مرجع ژنراتور طوری تغییر یابد که λ به $8/1$ برسد. با توجه به این توضیح‌ها و رابطه‌های (۱) و (۱۷)، رابطه (۱۹) برای تعیین P_{n-ref} پیشنهاد می‌شود:

$$P_{nref} = P_{n-initial} \pm k_1(1 - \exp(-k_2 |error|)) \quad (19)$$

$$error = \lambda - \lambda_{opt}$$

در این رابطه، ضرایب K_1 ، K_2 بهینه سازی شده‌اند. همچنین $P_{n-initial}$ به ترتیب، بیانگر حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی به ازای سرعت باد در لحظه جدید و سرعت باد در لحظه قدیم‌اند. از طرفی با توجه به اینکه طراحی کنترلر در بخش ۴ طوری صورت می‌پذیرد که توان‌های خروجی استاتور، توان‌های مرجع مربوط را ردیابی کنند، بنابراین داریم:

$$K = \begin{bmatrix} \eta_1 |s_1(t)|^{a1} & 0 \\ 0 & \eta_2 |s_2(t)|^{a2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

درایه‌های ماتریس K که ثابت و مثبت‌اند، در ضمیمه آورده شده‌اند. این درایه‌ها با توجه به مقادیر پهنای باند تغییرات پارامترهای سیستم در رابطه (۳۰) قابل محاسبه‌اند. روش محاسبه آن‌ها در [۲۰] آورده شده است؛ بنابراین از جای‌گذاری رابطه (۳۴) در رابطه (۳۳) پایداری تابع لیاپانوف با توجه به رابطه (۳۷) و مثبت بودن درایه‌های ماتریس K تضمین می‌شود:

$$\frac{dV}{dt} = S^T \frac{dS}{dt} = -S^T \begin{bmatrix} \eta_1 |s_1(t)|^{a1} & 0 \\ 0 & \eta_2 |s_2(t)|^{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(S_1) \\ \text{sgn}(S_2) \end{bmatrix} < 0 \quad (37)$$

نهایتاً مؤلفه‌های کنترلی ولتاژ روتور با توجه به رابطه (۳۴) و محاسبه مقادیر عددی ماتریس‌های $\hat{f}^*(x)$ و G_r با استفاده از رابطه‌های (۲۷) و (۲۸)، ماتریس A و پارامترهای سیستم که در بخش ضمیمه آورده شده، به صورت رابطه‌های (۳۸) و (۳۹) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} u_{rd} &= 1/6015x_1 + 0/019085x_2 + 0/0223x_3x_5 + \\ &0/022x_1x_5 + 343/47 + 5/9426 \times 10^{-7} \dot{y}_{1ref} \\ &+ 5/0512 \times 10^{-5} y_{1ref} + 0.009x_4 + \dots \\ &+ 5/9426 \times 10^{-7} \eta_1 |s_1(t)|^{a1} \text{sgn}(S_1(t)) \quad (38) \\ u_{rq} &= 0/041739x_1 + 0/2676x_2 + 0/009x_3 \\ &- 9/5082 \times 10^{-5} y_{2ref} - 5/9426 \times 10^{-7} \dot{y}_{2ref} \\ &- 0/022x_2x_5 - 0/0223x_4x_5 \\ &- 5/9426 \times 10^{-7} \eta_2 |s_2(t)|^{a2} \text{sgn}(S_2(t)) \quad (39) \end{aligned}$$

این مؤلفه‌ها پس از تبدیل مختصات از قاب مرجع سنکرون به قاب روتور، به عنوان مؤلفه‌های مرجع ولتاژ روتور به بلوک SVM تزریق می‌شوند. نهایتاً این بلوک الگوی کلیدزنی مبدل سمت روتور را تولید می‌کند. ساختار پیشنهادی کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه در شکل (۲) آورده شده است.

۵. نتایج شبیه‌سازی

هدف این بخش، ارائه نتایج شبیه‌سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی (کنترل مستقیم توان با استفاده از روش ترکیبی خطی سازی ورودی خروجی و کنترل مد لغزشی) برای توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی و چرخ‌دنده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB\Simulink.7.7.0(R2008b) برای مدل‌سازی کل سیستم از رابطه (۳) استفاده شده، و گام زمانی در شبیه‌سازی

$$f^* = \begin{bmatrix} L_f h_1 \\ L_f h_2 \end{bmatrix} + D_s \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (28)$$

رابطه (۲۴) می‌تواند به صورت رابطه (۲۹) بازنویسی شود:

$$\dot{y} = f^*(x) + G_r u_r \quad (29)$$

با توجه به این رابطه، خروجی سیستم با ورودی سیستم، رابطه مستقیم دارد. در حال حاضر هدف، تعیین مؤلفه‌های کنترلی ولتاژ روتور $u_r = [u_{rd} \ u_{rq}]^T$ است، به طوری که توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور مقادیر مطلوب مربوط را ردیابی کنند. در این مقاله، با توجه به وجود نامعینی در سیستم توربین بادی از کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده می‌شود. در گام اول طراحی کنترلر مد لغزشی، نامعینی سیستم توربین بادی با پهنای باند معین، در توابع $f^*(x)$ و G_r به صورت رابطه (۳۰) قابل تعریف است:

$$|f_i^*(x) - \hat{f}_i^*(x)| \leq \delta_i, G_r = (I + \Delta) \hat{G}_r, |\Delta_{ij}| \leq G_{ij} \quad (30)$$

در گام دوم، دو سطح لغزشی به صورت رابطه (۳۱) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} s_1(t) = y_1(t) - y_{1ref}(t) = P_s(t) - P_{ref} \\ s_2(t) = y_2(t) - y_{2ref}(t) = Q_s(t) - Q_{ref} \end{cases} \quad (31)$$

P_{ref} همان توان مرجعی است که استاتور به ازای مقادیر مختلف سرعت باد باید آن را تولید کند. این پارامتر در بخش ۲،۳ محاسبه شد. همچنین Q_{ref} توان راکتیو مطلوب است که در این مقاله، به صورت کسری از P_{ref} در نظر گرفته شده است. $P_s(t)$ و $Q_s(t)$ نیز توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور در هر لحظه‌اند که در بخش ۲،۲ محاسبه شدند. در گام سوم، تابع لیاپانوف به صورت رابطه (۳۲) معرفی می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} S^T S > 0 \quad (32)$$

شرط رسیدن سیستم به مد لغزشی، مستلزم پایداری تابع لیاپانوف (منفی بودن مشتق تابع لیاپانوف) است، بنابراین با توجه به رابطه‌های (۲۹) و (۳۱) داریم:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} (S^T \frac{dS}{dt} + S \frac{dS^T}{dt}) = S^T \frac{dS}{dt} = S^T (\hat{f}^*(x) + \hat{G}_r \hat{u}_r - \dot{y}_{ref}) \quad (33)$$

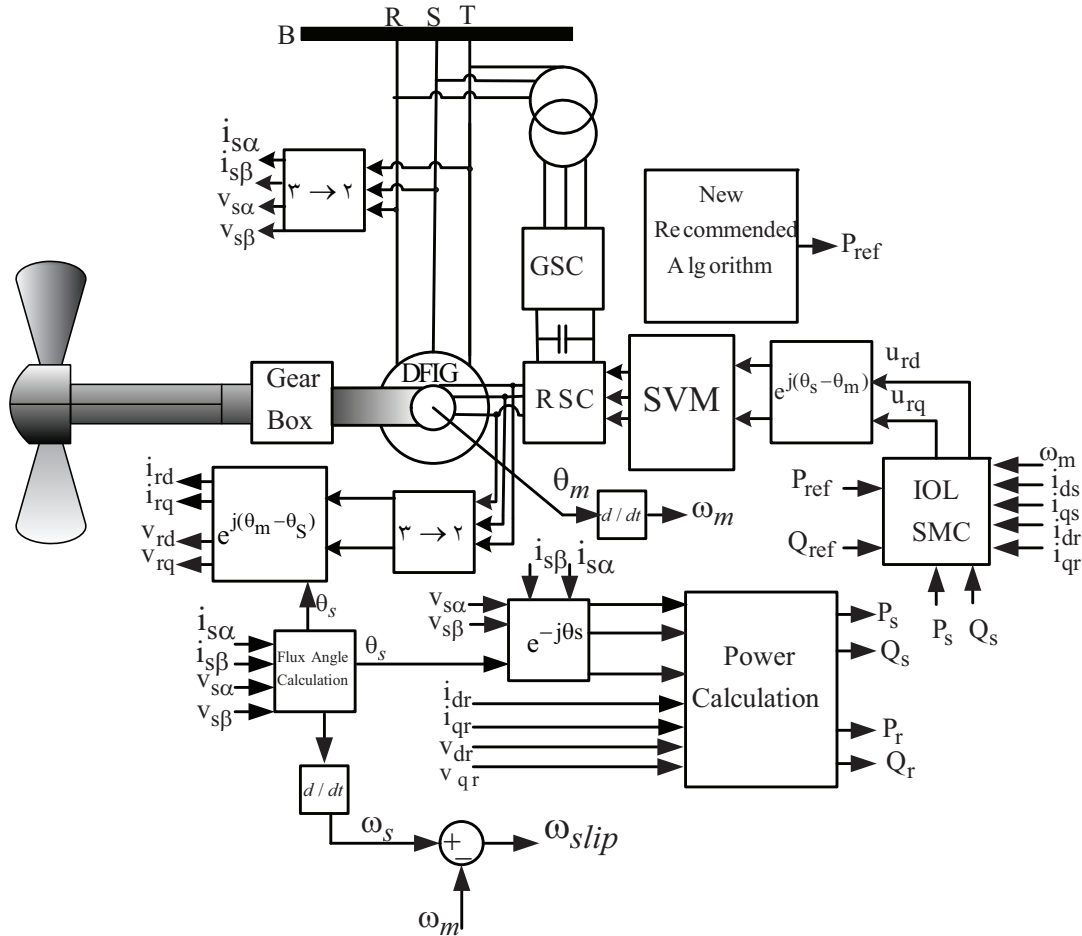
با در نظر گرفتن شرط پایداری تابع لیاپانوف (رابطه ۳۳) قانون

کنترلی به صورت رابطه (۳۴) پیشنهاد می‌شود:

$$u_r = \frac{-1}{\hat{G}_r} \left[\hat{f}^*(x) - \dot{y}_{ref} + K \text{sgn}(S_i) \right] \quad (34)$$

به طوری که در رابطه (۳۴) داریم:

$$\text{sgn}(s_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } s > 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (35)$$



شکل (۲): بلوک دیاگرام پیشنهادی برای پیاده‌سازی روش کنترل مستقیم توان با استفاده از کنترل مد لغزشی

همچنین شکل موج جریان استاتور نیز در شکل (۶) برای وضوح بیشتر در فاصله زمانی کم آورده شده است. با در نظر گرفتن شکل موج سرعت باد مذکور، شکل موج توان مرجع P_{ref} و پاسخ زمانی سیستم برای ردیابی این توان که شامل توان اکتیو استاتور (P_s) می‌باشد، در شکل (۶-الف) و (۶-ب) آورده شده است. در شکل (۶-الف) از الگوریتم پیشنهادی و در شکل (۶-ب) از جدول نظاره برای تعیین توان مرجع (حداکثر توان قابل جذب) استفاده شده است. با توجه به شکل موج‌ها مشاهده می‌شود که ردیابی توان‌ها در هر دو مورد با خطای قابل قبولی صورت پذیرفته است. همچنین شکل موج توان‌های اکتیو روتور نیز در هر دو شکل (۶-الف) و (۶-ب) آورده شده است. با توجه به شکل (۴)، ژنراتور در بازه زمانی ۸ تا ۱۰ ثانیه عملکرد فوق سنکرون دارد، بنابراین در این بازه زمانی، سیم‌پیچی‌های روتور نیز به شبکه الکتریکی توان تزریق می‌شوند. این موضوع در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) با توجه به منفی بودن توان‌های اکتیو و راکتیو روتور دیده می‌شود. در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نیز شکل موج توان مرجع Q_{ref} و پاسخ زمانی سیستم برای

۰/۰۱ s است. برای شبیه‌سازی سرعت باد از ترکیب سیگنال پله و نویز گوسی با واریانس ۰/۱ و زمان نمونه‌برداری ۰/۰۱ استفاده شده است (شکل ۳). توان نامی ژنراتور ۶۶۰ KW است و فرکانس شده سوئیچینگ مبدل‌های الکترونیک قدرت برای پیاده‌سازی روش SVM، ۱ کیلوهرتز می‌باشد. همچنین ولتاژ نامی لینک DC، ۶۰۰V است. با پیاده‌سازی روش کنترل‌برداری در مبدل سمت شبکه این ولتاژ تنظیم می‌شود [۲۱]. در این مقاله نیز از این روش استفاده شده است. همچنین برای تخمین موقعیت شار استاتور (θ_s) که در بلوک دیاگرام آورده شده، از روش [۲۲] استفاده شده است.

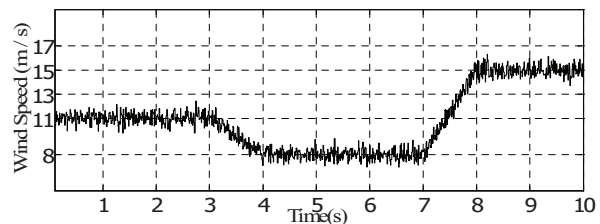
۱.۵. نتایج شبیه‌سازی کنترل مستقیم توان

با در نظر گرفتن شکل موج سرعت باد به صورت شکل (۳)، شکل موج سرعت ژنراتور در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق این شکل، ژنراتور تا زمان ۸ ثانیه در مد زیر سنکرون و بعد از آن در مد فوق سنکرون است. در مرحله بعدی، جریان سه فاز روتور در شکل (۵-الف) در فاصله زمانی ۰ تا ۱۰ ثانیه و در شکل (۵-ب) در فاصله زمانی ۱/۲ تا ۲/۴ ثانیه برای وضوح بیشتر آورده شده است.

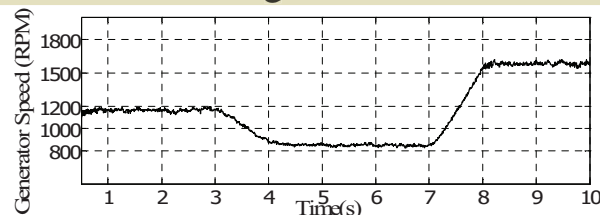
ردیابی این توان به همراه شکل موج توان راکتیو روتور آورده شده است.

۲.۵. تحلیل نتایج ردیابی حداکثر توان و مقایسه روش پیشنهادی و روش جدول نظاره

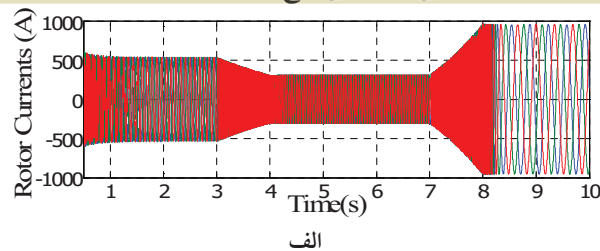
نسبت سرعت نوک پره‌ها (λ) پارامتر مناسبی برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده جهت تولید حداکثر توان توسط ژنراتور به ازای مقادیر مختلف سرعت باد است. همانطور که در بخش ۳.۲ گفته شد، برای جذب حداکثر توان به ازای مقادیر مختلف سرعت باد مقدار C_p ، λ به ترتیب، باید ۰/۴۸ و ۸/۱ باشد. در شکل‌های



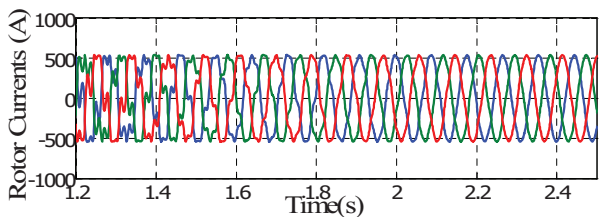
شکل (۳): شکل موج سرعت باد



شکل (۴): شکل موج سرعت ژنراتور

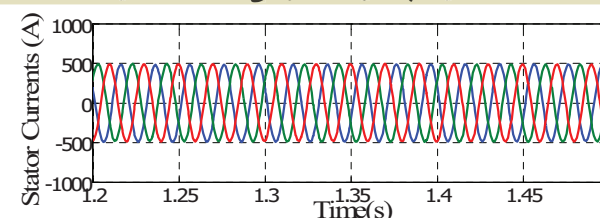


الف



ب

شکل (۵): شکل موج جریان سه فاز روتور الف- در فاصله زمانی ۰ تا ۱۰ ثانیه، ب- در فاصله زمانی ۱/۲ تا ۲/۴ ثانیه



شکل (۶): شکل موج جریان سه فاز استاتور در فاصله زمانی ۱/۲ تا ۱/۴۵ ثانیه

(۹) و (۱۰) دیده می‌شود که این کمیت‌ها حول نقاط بهینه مربوط نوسان می‌کنند. هر چقدر میزان خطای λ نسبت به مقدار بهینه مربوط کمتر باشد، بدین معنی است که حداکثر توان از توربین بادی جذب و توسط ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل، و نهایتاً به شبکه الکتریکی تزریق می‌شود.

۳.۵. تحلیل مقاومت کنترل‌کننده

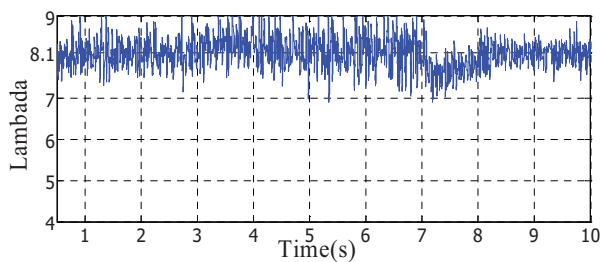
در این بخش، تحلیل مقاومت کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط تغییر پارامترهای ماشین در طول زمان بررسی می‌شود. الگوهای تغییرات پارامترهای ماشین در جدول (۱) آورده شده است. با اعمال این الگوها به سیستم در بازه زمانی ۵ تا ۵/۵ ثانیه، نتایج شکل موج‌های توان اکتیو و راکتیو استاتور در شکل (۱۱) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در شرایط تغییر پارامترهای ژنراتور، شکل موج‌های توان اکتیو و راکتیو در هر چهار الگو با یکدیگر مطابقت دارند. این موضوع، مقاومت کنترل‌کننده را در شرایط تغییر پارامترهای ژنراتور نشان می‌دهد. همچنین نتایج درصد خطای λ در شرایط تغییر پارامترهای ژنراتور به ازای پیاده‌سازی روش جدول نظاره و الگوریتم پیشنهادی، در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس این نتایج، درصد خطای λ در نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی کمتر از حالتی است که از جدول نظاره استفاده شده است. هر چقدر میزان خطای λ نسبت به مقدار بهینه کمتر باشد، بدین معنی است که حداکثر توان با خطای کمتری از توربین بادی جذب، و توسط ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل، و به شبکه الکتریکی تزریق می‌شود.

۴.۵. ارزیابی THD شکل موج جریان استاتور و روتور

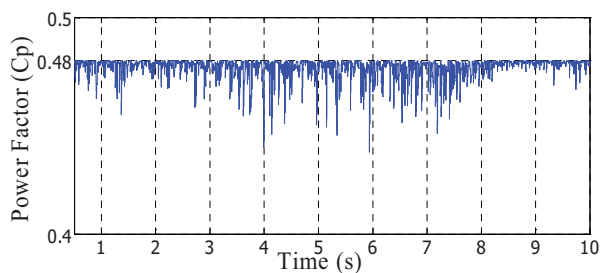
در شکل (۱۲)، شکل موج مؤلفه‌های ولتاژ روتور با در نظر گرفتن سرعت باد، به صورت شکل (۳) آورده شده‌اند. این مؤلفه‌ها در بلوک دیاگرام شکل (۲) به عنوان ورودی‌های بلوک SVM محسوب می‌شوند. این مؤلفه‌ها در بلوک دیاگرام شکل (۲) به عنوان ورودی‌های بلوک SVM محسوب می‌شوند. نهایتاً این بلوک الگوی کلیدزنی مبدل سمت روتور را ایجاد می‌کند. همچنین شکل موج طیف فرکانسی جریان استاتور و روتور به همراه محاسبه THD مربوط به آن‌ها در زمانی که سرعت متوسط باد ۱۱ m/s باشد، به ترتیب در

جدول (۱): درصد تغییرات پارامترهای ماشین و درصد خطای ردیابی

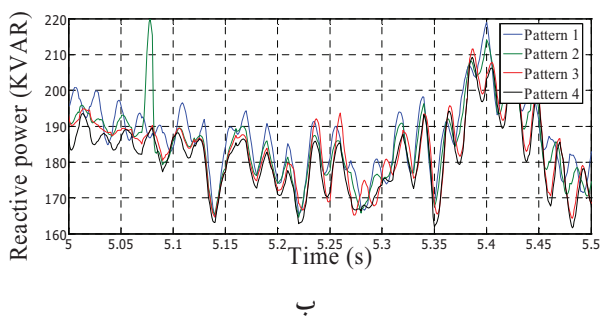
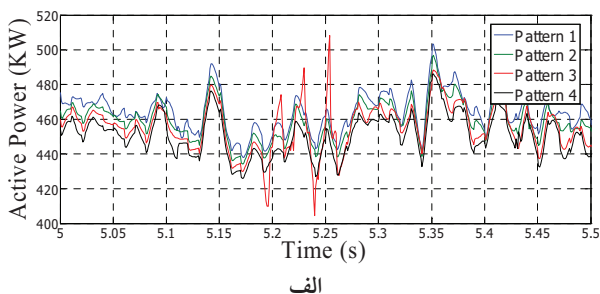
ارزیابی مقاومت روش کنترلی پیشنهادی برای توربین بادی					
درصد تغییر پارامترها				درصد خطای λ	
R_r	R_s	L_r	L_s	جدول نظاره	روش بلادرنگ
۰	۰	۰	۰	۰/۲۰۱۶	۰/۰۰۳۴
۵۰	۲۰	۲	۵	۰/۵۳۷۲	۰/۰۰۳۶
۱۰۰	۱۰۰	۵	۵	۱/۰۵۴۵	۰/۰۰۳۸
۱۵۰	۱۵۰	-۵	۵	۱/۰۵۸۹	۰/۰۰۴۲



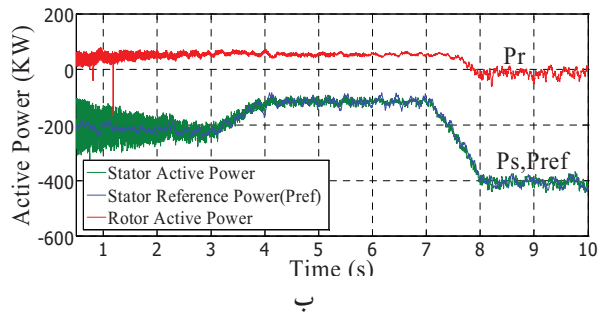
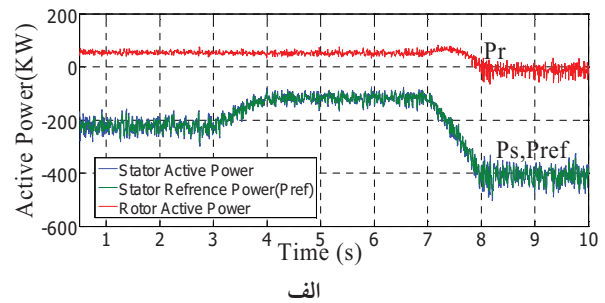
شکل (۹): نسبت سرعت خطی توربین بادی (λ)



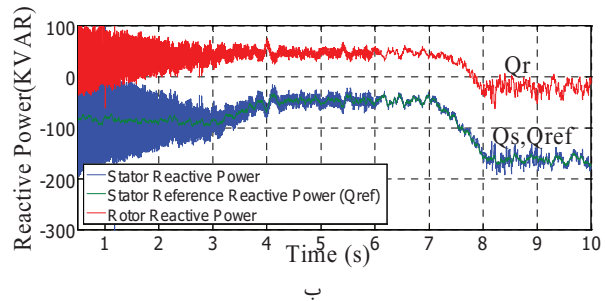
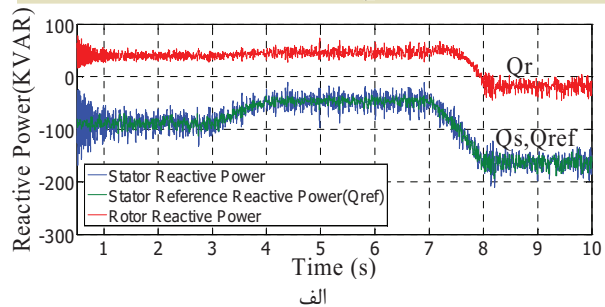
شکل (۱۰): ضریب قدرت توربین بادی



شکل (۱۱): الف- شکل موج توان اکتیو استاتور به ازای تغییرات پارامترهای ماشین در جدول (۱)، ب- شکل موج توان راکتیو استاتور به ازای تغییرات پارامترهای ماشین در جدول (۱)



شکل (۷): ردیابی توان اکتیو استاتور در نتیجه پیاده سازی روش کنترل مستقیم توان پیشنهادی با استفاده از کنترل مد لغزشی و شکل موج توان اکتیو روتور الف- استفاده از الگوریتم پیشنهادی ب- استفاده از جدول نظاره



شکل (۸): ردیابی توان راکتیو استاتور در نتیجه پیاده سازی روش کنترل مستقیم توان پیشنهادی با استفاده از کنترل مد لغزشی و شکل موج توان راکتیو روتور الف- استفاده از الگوریتم پیشنهادی ب- استفاده از جدول نظاره

شکل های (۱۳) و (۱۴) آورده شده اند. به ازای سرعت باد مذکور، فرکانس اعمالی به سیم پیچی های روتور ۱۸ HZ می باشد. این فرکانس برابر با فرکانس لغزشی ژنراتور در این شرایط می باشد. با توجه به این نمودارها هر دو شکل موج جریان استاتور و شکل موج جریان روتور در نتیجه پیاده سازی روش «کنترلی مستقیم توان با استفاده از کنترل مد لغزشی» THD قابل قبولی برخوردارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیأت تحریریه مجله علمی - پژوهشی مدیریت انرژی کمال سپاسگزاری را دارند.

ضمایم

جدول (۲): پارامترهای سیستم توربین بادی

۴ Kg.m ²	ضریب لختی توربین J
۵۹۴ KW	توان توربین P _N
۸ m/s	حداقل سرعت جهت راه‌اندازی
۱۷ m/s	سرعت نامی
۵/۰۶۵	ضریب چرخ‌دنده K _{gear}

پارامترهای ضریب توان توربین بادی مفروض:

$$C_1=0.5176 \quad C_2=116, \quad C_3=0.4, \quad C_4=0.0068$$

$$C_5=21 \quad C_6=0.0068 \quad C_7=0.08 \quad C_8=0.035$$

جدول (۳): پارامترهای ژنراتور القایی دوگانه تغذیه

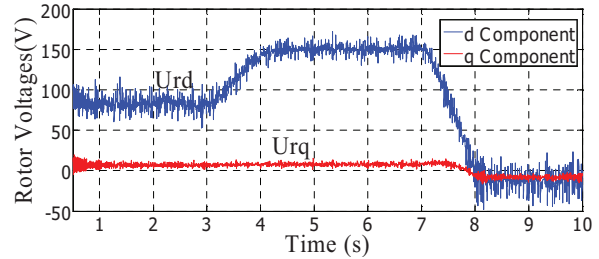
۴۰۰V	ولتاژ استاتور
۵۰HZ	فرکانس
۶۶۰KW	توان ژنراتور
۶/۵ mΩ	مقاومت استاتور
۹ mΩ	مقاومت روتور
۰/۱۵ mH	اندوکتانس نشستی استاتور
۰/۱۵ mH	اندوکتانس نشستی روتور
۱۱ mH	اندوکتانس متقابل
۴۴۰V	ولتاژ روتور
۲	تعداد جفت قطب

ضرایب درایه‌های ماتریس **K**:

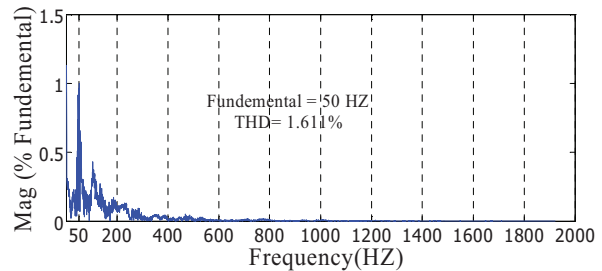
$$\eta_1 = 0.85, \eta_2 = 0.32, a_1 = 2.3, a_2 = 1.52$$

جدول (۴): پارامترهای توربین بادی

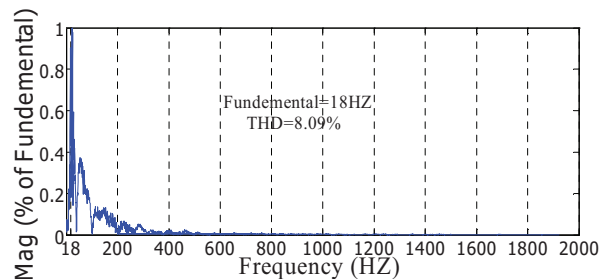
۴ Kg.m ²	ضریب لختی توربین J
۵۹۴ KW	توان توربین P _N
۸ m/s	حداقل سرعت جهت راه‌اندازی
۱۷ m/s	سرعت نامی
۵/۰۶۵	ضریب چرخ‌دنده K _{gear}



شکل (۱۲): مؤلفه‌های ولتاژ روتور (اعمالی به بلوک SVM)



شکل (۱۳): شکل موج طیف فرکانسی جریان استاتور



شکل (۱۴): شکل موج طیف فرکانسی جریان روتور

۶. نتیجه‌گیری

از آنجا که تولید حداکثر توان الکتریکی به ازای سرعت‌های مختلف باد در هر سیستم توربین بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در این مقاله به کنترل سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه برای به دست آوردن حداکثر توان پرداخته شد. برای کنترل سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه از کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده شد و مشاهده گردید که روش کنترل مستقیم توان پیشنهادی ردیابی توان را با حداقل خطا انجام می‌دهد. از ویژگی‌های روش کنترل پیشنهادی، عدم نیاز آن به جداسازی مؤلفه‌های جریان روتور و دارا بودن مقدار *THD* مورد قبول جریان‌های استاتور و روتور آن است. همچنین برای تعیین حداکثر توان قابل جذب از توربین بادی به ازای سرعت‌های مختلف باد از روش مرسوم جدول نظاره و روش جدید بلادرنگ استفاده شد. مشاهده شد که درصد خطا برای ردیابی حداکثر توان در روش بلادرنگ پیشنهادی نسبت به روش جدول نظاره در شرایط تغییر پارامترهای سیستم کمتر است.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} K & (\frac{2M^2 \pi f}{L_s L_r} - 2\pi f)k & \frac{MR_r}{L_s L_r} k & \frac{PM^2}{2L_s L_r} & -\frac{PM}{2L_s} & -\frac{M}{L_s L_r} k & 0 \\ -(\frac{2M^2 \pi f}{L_s L_r} - 2\pi f)k & -\frac{R_s}{L_s} K & \frac{MR_r}{L_s L_r} k & \frac{PM}{2L_s} & \frac{PM^2}{2L_s L_r} & -\frac{M}{L_s L_r} k & \frac{1}{L_s} k \\ \frac{MR_s}{L_s L_r} k & -\frac{R_r}{L_r} K & (\frac{2M^2 \pi f}{L_s L_r} - 2\pi f)k & \frac{p}{2} k & \frac{PM}{2L_r} k & \frac{1}{L_r} k & 0 \\ \frac{MR_s}{L_s L_r} k & -(\frac{2M^2 \pi f}{L_s L_r} - 2\pi f)k & -\frac{R_r}{L_r} K & \frac{p}{2} k & -\frac{PM}{2L_r} k & \frac{1}{L_r} k & -\frac{M}{L_s L_r} \\ \frac{3p}{4J} & -\frac{3p}{4J} & -\frac{B}{J} & \frac{1}{J} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

مراجع

- [1] Gsanger, S., (2008, Nov.). World Wind Energy Association, Germany, [Online]. Available: <http://www.wwindea.org>.
- [2] Ackermann, T., *Wind Power in Power System*, John Wiley & Sons, England, 2005.
- [3] Quang, N. P., Dittrich, J. -A, *Vector Control of Three-Phase AC Machine*, German: Springer, 2008.
- [4] Tapia, G., Tapia, A., Ostolaza, J.X., "Modeling and control of wind turbine driven by doubly fed induction generator", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.18, no.2, pp.194-204, Nov. 2004.
- [5] Tapia, G., Tapia, A., Ostolaza, J.X., "Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performance", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.21, no. 04, pp. 909-920, Dec. 2006.
- [6] Orlando, S., Henrique, G., Antonio, M., Adriano, C., "Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems", Renewable Energy, vol.35, pp. 1662-1670, 2010.
- [7] Takahashi, I., Noguchi, T., "A new quick-response and high-frequency control strategy of an induction motor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.IA22, no. 5, pp. 820-827, Sep. 1986.
- [8] Depenbrock, M., "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine", IEEE Trans. Power Electron. vol. PEL-3, no. 4, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [9] Datta, R., Ranganathan, V. T., "Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without position sensors", IEEE Trans. Power electron., vol. 16, no. 3, pp. 390-399, May 2001.
- [10] Xu, L., Cartwright, P., "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 750-758, Sep. 2006.
- [11] Utkin, V.I., "Sliding Mode control design principles and applications to Electric drives", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, Feb.1993.
- [12] Ben Elghali, S. E., Benbouzid, M. E. H., Ahmad-Ali, T., Charpentier, J. F., Mekri, F., "High-order sliding mode control of DFIG-based marine current turbine", in Proc. IEEE. IECON. Conf, pp.1228-1233, 2008.
- [13] Beltran, B., Ahmad-Ali, T., Benbouzid, M. E. H., "High order sliding mode control of DFIG-based wind

- turbine for power maximization and grid fault tolerance", in Proc. IEEE IEMDC . Conf, pp. 183-189, 2009.
- [14] Karous, D., Wamkeue, R., Belmadani, B., "Sliding Mode control of DFIG Based Variable Speed WECS with Flywheel Energy Storage", in proc. IEEE ICEM, pp.1-6, 2010.
- [15] Hu, J., Nian, H., Hu, B., He, Y., Zhu, Z. Q., "Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach", IEEE Transaction. Energy Conversion, vol.25, no.4, pp.1028-1039, June.2010.
- [16] Chen, S. Z., Cheung, N. C., Wong, K. Ch., Wu, J., "Integral Sliding-Mode Control Direct Torque Control Under Unbalanced Grid Voltage", IEEE Trans. Energy Conversion , Vol.25, No.2, pp.356-368, June.2010.
- [17] Hemdani, A., Ghorbal, M. J. B., Naouar, M. W., Belkhdja, I.S., "Design of a Switching Table for Direct Power Control of a DFIG Using Sliding Mode Theory" , in proc. IEEE System, Signals and Devices. Conf, pp.1-7, 2011.
- [18] Tohidi, A., *Control of DFIG Generators in Wind Powers Stations for Maximum Absorbable Power in Wind Velocities*, M.Sc Thesis, K. N. Toosi University of Technology, Iran, Tehran, 2009.
- [19] The Math Works, *SimPower Systems for Use with Simulink*, User's Guide Version 4, 2008.
- [20] Slotine, J.J, *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffss NJ. Tice Hall, 1991.
- [21] Boldea, I., *Variable Speed Generator*, USA: Taylor & Francis Group, 2006.
- [22] R., Pena, Clare, J. C., Asher, G. M., "Doubly fed induction generator using back to back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation", in Proc. Inst. Elect. Eng. Conf, vol. 143, no. 3, pp. 231-241, 1996.
- [۲۳] روزبهانی، سام ، توحیدی، اکبر، خاکی صدیق، علی و عباسزاده، کریم، «روش جدید برای استحصال حداکثر توان از سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوگانه تغذیه»، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC)، ۱۳۸۹.