

بهبود عملکرد و کاهش محاسبات کنترل پیش بین مدل ژنراتور القایی دو تحریکه متصل به توربین بادی

آریا یونسی^۱، سجاد توحیدی^۲، محمدرضا فیضی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز، ariayounesi@tabrizu.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشگاه تبریز، تبریز، stohidi@tabrizu.ac.ir

^۳ استاد، دانشگاه تبریز، تبریز، feyzi@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک روش جدید مبتنی بر کنترل پیش بین مدل برای کنترل توان ژنراتور القایی دوتحریکه (DFIG) پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی، از مدل غیرخطی DFIG برای افزایش دقت در مدل پیش بینی استفاده می‌شود که البته این مساله بار محاسباتی سیستم را بیش از پیش افزایش خواهد داد. در نتیجه برای کاهش محاسبات، استفاده از کنترل پیش بین زمان گسسته با زمان نمونه برداری متغیر پیشنهاد می‌شود. با این کار، زمان محاسبات بهینه‌سازی تابع هدف بسیار پایین‌تر از روش‌های کنترل پیش بین موجود، خواهد بود. این کاهش محاسبات شرایط را برای استفاده از کران پیش بین بالاتر فراهم می‌آورد. بنابراین، عملکرد کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو بسیار مطلوب‌تری را با ریزل توان کمتر و سرعت ردیابی بهتری را در مقایسه با روش‌های پیشین نتیجه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB/Simulink کاهش بیش از ۵۰ درصدی زمان محاسبات روش پیشنهادی را برای کران پیش بین برابر ۳ در مقایسه با روش کنترل پیش بین معمولی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

کنترل پیش بین مدل، کنترل توان اکتیو و راکتیو، ژنراتور القایی دوتحریکه، توربین بادی، زمان نمونه برداری متغیر

مقدمه

امروزه، توربین‌های بادی سرعت متغیر به دلیل مزایای فراوانی که در مقابل توربین‌های سرعت ثابت دارند، به صورت چشمگیری در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، توربین‌های سرعت متغیر محدود با DFIG، به دلیل استفاده از مبدل با توان نامی پایین‌تر و در نتیجه هزینه اولیه بسیار پایین‌تر و همچنین، قابلیت کنترل مجزای توان‌های اکتیو و راکتیو از طریق تغذیه جریان‌های روتور، محبوبیت بسیار بالایی در صنعت پیدا کرده‌اند، به گونه‌ای که بیش از ۷۰ درصد توربین‌های امروزی از نوع سرعت متغیر با DFIG هستند [۱]. در این نوع توربین‌ها، از یک DFIG و یک مبدل الکترونیک قدرت پشت به

پشت استفاده شده است [۲]. از مزایای این نوع توربین بادی می‌توان به، تغییرات سرعت ژنراتور تا ۳۰ بالاتر یا پایین‌تر از سرعت نامی، استفاده از مبدل با ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور، افزایش بازده انرژی، کاهش تنش مکانیکی، عدم نیاز به جبران‌ساز توان راکتیو و بانک خازنی، شرایط بهتر اتصال به شبکه ناشی از وجود مبدل الکترونیک قدرت، استحکام بالاتر و عملکرد کنترل توان بهتر در مقایسه با توربین‌های سرعت ثابت و سایر توربین‌های سرعت متغیر محدود اشاره کرد [۳].

تاکنون روش‌های کنترلی مختلف برای DFIG ارائه شده است. در [۲]، روش‌های مبتنی بر کنترل برداری و کنترل میدان گرا برای کنترل توان این ژنراتور به کار برده شده است. در این روش‌ها جریان روتور DFIG جداسازی شده و به مولفه‌های اکتیو و راکتیو در قاب مرجع گردان d-q تبدیل می‌شود. بنابراین با کنترل جریان‌های روتور از طریق مبدل سمت روتور، توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور نیز کنترل می‌شوند. اما در این روش‌ها، با وجود عملکرد مناسب سیستم در حالت ماندگار، چون یک ساختار آبخاری دارند و از کنترل‌کننده‌های (PI) در ساختار آن استفاده می‌شود، به تغییر پارامترهای ماشین حساس هستند و دینامیک پایینی هم دارند [۴، ۵].

با پیشرفت علم و فناوری، نسل جدیدی از کنترل‌کننده‌ها مبتنی بر MPC برای برطرف کردن این محدودیت‌ها و بالا بردن دینامیک سیستم برای کاربردهای گوناگون ظهور پیدا کرد [۶، ۷، ۸]. در [۹، ۱۰]، از MPC در ساختار روش DTC استفاده شده است. این برای کنترل شار و گشتاور یک DFIG در [۱۱] ارائه شده است. این روش‌ها اگر چه بسیاری از این مشکلات را حل کرده است، ولی هنوز به یک مدولاتور برای تعیین زمان دقیق بردارهای ولتاژ نیاز دارند. در [۱۲]، از MPC برای کنترل مستقیم توان در DFIG مبتنی بر سه بردار ولتاژ استفاده شده است. در این روش‌ها، در هر لحظه از زمان از سه بردار ولتاژ استفاده می‌شود. با وجود اینکه این روش پاسخ دینامیکی خوبی دارد و نوسان گشتاور را نیز پایین آورده است، اما هنوز این روش کنترلی بسیار پیچیده است و نیاز به محاسبه دقیق

¹ Back to Back

² Field Oriented Control (FOC)

[۲۳]، زیرا با افزایش کران پیش بین زمان محاسبات به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این محدودیت عملکرد کنترل‌کننده را نیز محدود می‌کند، زیرا در روش‌های مبتنی بر MPC، افزایش کران پیش بین، عموماً عملکرد کنترلی بهتری را نتیجه می‌دهد [۲۴].

در حالت کلی، اهداف کنترلی در DFIG به دو دسته تقسیم می‌شوند. هدف اصلی ردیابی توان‌های اکتیو و راکتیو مورد نظر است. از آنجا که سرعت باد همیشه در حال تغییر است، قدرت خروجی DFIG نیز باید به صورت مداوم برای ردیابی مقدار مرجع آن تنظیم شود و این یک مساله کنترل برخط^۷ DFIG در ساختار توربین بادی را نتیجه می‌دهد. هدف دوم محدود کردن جریان روتور در هنگام افت ولتاژ شبکه است، چرا که این ژنراتور از یک مبدل با ۳۰ درصد توان نامی استفاده می‌کند. با توجه به این هدف، کنترل DFIG یک مساله دارای محدودیت^۸ است. به طور کامل با توجه به این دو هدف، مساله کنترل DFIG را می‌توان به عنوان یک مساله کنترلی مقید برخط^۹ در نظر گرفت [۲۵]. بنابراین پیشنهاد می‌شود از یک روش مبتنی بر MPC گرفته شود که بتواند مساله مطرح شده را به بهترین شیوه پاسخ دهد، استفاده شود. با استفاده از این کنترل‌کننده به راحتی می‌توان به صورت آنلاین مساله مورد نظر را حل کرده و همچنین به راحتی می‌توان محدودیت‌های دلخواهی برای هر یک از پارامترهای سیستم لحاظ کرد.

در روش FCS-MPC پیشنهادی از مدل غیرخطی DFIG برای افزایش دقت در مدل پیش بینی استفاده می‌شود. همچنین برای کاهش زمان محاسبات سیستم از یک الگوریتم مقایسه‌گر در ساختار بهینه‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود. به علاوه، در مدل پیش بینی از زمان نمونه‌برداری مختلف استفاده می‌شود، به طوری که بتوان با افق پیش‌بین پایین‌تری نسبت به حالت معمول رفتار سیستم را تا لحظات بیشتری پیش بینی کرد.

ساختار سیستم

مدل دینامیکی یک ژنراتور القایی دوتحریکه در قاب مرجع d-q به فرم زیر نوشته می‌شود.

$$v_{s,dq} = R_s i_{s,dq} + \frac{d}{dt} \psi_{s,dq} + j \omega_s \psi_{s,dq} \quad (1)$$

$$v_{r,dq} = R_r i_{r,dq} + \frac{d}{dt} \psi_{r,dq} + j (\omega_s - \omega_r) \psi_{r,dq} \quad (2)$$

$$\psi_{s,dq} = \frac{v_{s,dq} - R_s i_{s,dq}}{j \omega_s} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3P_p L_m}{2\omega_s L_s} (-i_{qr} v_{qs} + R_s i_{qs} i_{qr} + R_s i_{ds} i_{dr} - i_{dr} v_{ds}) \quad (4)$$

در این معادلات، $v_{s,dq}$ و $v_{r,dq}$ به ترتیب بردارهای ولتاژ استاتور و روتور، $i_{s,dq}$ و $i_{r,dq}$ به ترتیب بردارهای جریان استاتور و روتور، $\psi_{s,dq}$ و $\psi_{r,dq}$ به ترتیب بردارهای شار استاتور و روتور، L_s شار

بازه زمانی هر یک از این سه بردار ولتاژ را دارد. در [۱۳]، یک MPC غیر خطی^۳ برای کنترل DFIG ارائه شده است. MPC ارائه شده با وجود اینکه از مدل غیرخطی سیستم استفاده می‌کند، اما از خطی ساز فیدبک ورودی-خروجی^۴ برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو استفاده می‌کند. در [۱۴]، یک MPC پیوسته زمان مقاوم برای کنترل مستقیم توان DFIG ارائه شده است. در این روش از بسط تیلور برای پیش بینی جریان‌های استاتور در قاب مرجع سنکرون استفاده شده است. این روش پاسخ مناسبی را در شرایط مختلف سنکرون، زیر سنکرون و فوق سنکرون ارائه می‌دهد. اما به دلیل پیوسته زمان بودن آن، زمان نمونه برداری آن ثابت نیست. به علاوه یک مرحله مولاتور نیز برای تعیین بردارهای ولتاژ آن مورد نیاز است. در [۱۵]، از کنترل تضعیف میدان و کنترل پیش بین شار نشستی به طور هم‌زمان برای کنترل شار روتور DFIG در شرایط بروز خطا در شبکه استفاده شده است. در این روش نیز استفاده از مدولاتور ولتاژ ضروری است. هم-چنین، در [۱۶]، نیز از MPC برای کمینه کردن نوسان گشتاور DFIG در ساختار یک شبکه DC استفاده شده است. این روش نیز علاوه بر این که از مدولاتور برای تعیین بردارهای ولتاژ استفاده می‌کند، کماکان دارای حلقه‌های کنترلی PI است. یک MPC بهبود یافته برای کنترل مستقیم توان، مبتنی بر چهار بردار کلیدزنی در [۱۷] پیشنهاد شده است.

در [۱۸]، با استفاده از یک مبدل سه سطحه با نقطه خنثی^۵ یک FCS-MPC مقاوم در مقابل خطا پیشنهاد شده است. در این روش به دلیل بالا رفتن حالت‌های پیش بینی پیچیدگی و محاسبات سیستم بسیار بالا رفته است. در [۱۹]، یک FCS-MPC برای پیش بینی جریان‌های استاتور در DFIG ارائه شده است. در این روش با کم کردن تعداد ورودی‌های کنترلی به از هشت به دو، پیچیدگی سیستم بسیار پایین آمده است و در کنار آن با بالا بردن زمان نمونه‌برداری پاسخ دینامیکی سیستم بهبود داده شده است.

با وجود راه‌کارهایی که تاکنون به منظور استفاده از FCS-MPC برای کنترل DFIG ارائه شده است، اما هنوز پیاده‌سازی این روش کار آسانی نیست. مانع اصلی در این راه، محاسبات سنگینی است که به دلیل پیش بینی مدل روی یک کران پیش بین محدود^۶ به وجود می‌آید [۲۰]. در استراتژی‌های موجود برای FCS-MPC، فرآیند بهینه‌سازی ورودی‌های کنترلی با جستجوی کامل تابع هدف روی کران پیش بین صورت می‌گیرد، و این کار بسیار وقت‌گیر است [۲۱]. این زمان محاسبات طولانی دو مشکل ایجاد می‌کند. از یک طرف، این زمان از محدودیت زمانی کنترل‌کننده فراتر خواهد رفت، لذا باید فرکانس نمونه‌برداری را بالاتر انتخاب کرد، زیرا عملکرد کنترل‌کننده در زمان نمونه‌برداری پایین غیر ممکن خواهد بود. این باعث پایین آمدن عملکرد سیستم خواهد شد. در طرف دیگر، این مساله کران پیش بین FCS-MPC را به حداکثر یک یا دو محدود می‌کند [۲۲].

³ Nonlinear MPC

⁴ Input-Output Feedback Linearization

⁵ Neutral Point Clamped

⁶ Finite Prediction Horizon

⁷ Online

⁸ Constrained Problem

⁹ Online Constrained Control Problem

پیوندی استاتور، L_m شار مغناطیس‌کنندگی و R_r و R_s به ترتیب مقاومت‌های سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور هستند. همچنین ω_s سرعت سنکرون، ω_r سرعت زاویه‌ای روتور و P_p تعداد زوج قطب‌های ژنراتور است. توانی که توربین بادی از باد دریافت می‌کند با رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_T = P_w \times C_p = \frac{1}{2} \rho A_T v_w^3 C_p \quad (5)$$

که در آن، C_p ضریب توان پره‌های توربین است.

اهداف کنترلی

از آنجا که سرعت باد به طور دائم در حال تغییر است، خروجی توان DFIG باید همواره مقدار مرجع را ردیابی کند. بنابراین مهم‌ترین هدف کنترلی در ژنراتورهای بادی ردیابی توان‌های اکتیو و راکتیو است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (6)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (7)$$

که در آن‌ها، P_s و Q_s به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو DFIG هستند.

کنترل پیش بین مدل ژنراتور القایی دوتحریکه

در حالت کلی، روش MPC از یک مدل صریح سیستم برای پیش بینی رفتار آن در لحظات آینده استفاده می‌کند. در این روش خروجی سیستم کنترلی با حل یک مساله بهینه‌سازی به دست می‌آید. برای حل این مساله، اختلاف بین خروجی پیش بینی شده و مقدار مرجع طی یک بازه زمانی مشخص و با رعایت محدودیت‌های موجود برای ورودی‌ها، خروجی‌ها و یا هر یک از متغیرهای حالت سیستم با استفاده از یک تابع هدف مشخص کمینه‌سازی می‌شود [۲۶].

همان‌طور که اشاره شد، در این مقاله از کنترل پیش بین گسسته زمان با مجموعه کنترلی محدود استفاده می‌شود. به همین دلیل به معادلات حالت گسسته زمان ژنراتور القایی دوتحریکه در فضای حالت نیاز است. با فرض i_{ds} ، i_{qs} ، i_{dr} و i_{qr} به عنوان حالت‌های سیستم و T_s به عنوان زمان نمونه برداری، جریان‌های پیش بینی شده استاتور و روتور به کمک روش اویلر پیشرو به صورت زیر نتیجه خواهند شد.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^p(k+1) \\ i_{qs}^p(k+1) \\ i_{dr}^p(k+1) \\ i_{qr}^p(k+1) \end{bmatrix}_{4 \times 1} = [\Phi(k)]_{4 \times 4} \begin{bmatrix} i_{ds}(k) \\ i_{qs}(k) \\ i_{dr}(k) \\ i_{qr}(k) \end{bmatrix}_{4 \times 1} + [\Gamma]_{4 \times 4} \begin{bmatrix} v_{ds}(k) \\ v_{qs}(k) \\ v_{dr}^p(k) \\ v_{qr}^p(k) \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (8)$$

که در آن، $i_{dr}^p(k+1)$ ، $i_{qs}^p(k+1)$ ، $i_{qr}^p(k+1)$ و $i_{ds}^p(k+1)$ به ترتیب جریان‌های پیش بینی شده استاتور و روتور در قلاب مرجع سنکرون $d-q$ هستند. همچنین مقادیر $\Phi(k)$ و Γ که به ترتیب ماتریس‌های حالت و ورودی مدل گسسته زمان ژنراتور القایی دوتحریکه هستند از روی ماتریس‌های پیوسته زمان و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Phi(k) = (I + A(k)T_s), \quad \Gamma = BT_s \quad (9)$$

تابع پیشنهادی در این مقاله به صورت مجموع قدرمطلق تفاضل جریان محورهای d و q روتور پیش بینی شده از مقادیر مرجع آن‌ها تعریف شده است که رابطه زیر نشان داده شده است.

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} \left(\left| P_d |i_{dr}^*(k+1) - i_{dr}^p(k+1)| + P_q |i_{qr}^*(k+1) - i_{qr}^p(k+1)| \right| \right) \quad (10)$$

که در آن، P_d و P_q ضرایب وزنی، N_p کران پیش بین و J تابع هدف پیشنهادی هستند.

در روش‌های مبتنی بر کنترل پیش بین مدل افزایش کران پیش بین، توانی بردار بهینه مطلوب‌تری را نتیجه می‌دهد. این در حالی است که با توجه به رابطه ۱۰، متناسب با افزایش کران پیش بین بار محاسباتی سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند، برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله نیز مشابه [۲۷] استفاده از زمان نمونه برداری متغیر با زمان پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، زمان نمونه برداری در مدل پیش بینی به صورت افزایشی و متناسب با کران پیش بین مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در این مقاله از ساختار بهینه‌سازی افزایشی برای پیاده‌سازی الگوریتم کنترل پیش بین استفاده می‌شود. به طوری که در هر مرحله پیش بینی و محاسبه تابع هدف، مقدار آن با حالت قبلی مقایسه می‌شود و چنانچه از مقدار حالت قبلی بیشتر باشد از ادامه بررسی این حالت برای کران پیش بین‌های بالاتر صرف‌نظر می‌کند. این الگوریتم نیز تاثیر بسیار بالایی در کاهش زمان محاسبات خواهد داشت. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ آمده است.

نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد روش کنترل پیش بین پیشنهادی، کل سیستم در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است. برای این کار از یک موتور القایی روتور سیم بندی سه فاز با توان ۳ مگا وات، ۶۹۰ ولت، ۶۰ هرتز با تعداد زوج قطب برابر با ۲، استفاده شده است.

در این بخش ابتدا پاسخ حالت ماندگار روش کنترل پیشنهادی بررسی شده است. در ادامه عملکرد ردیابی توان اکتیو ژنراتور القایی دوتحریکه با تغییرات سرعت باد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت میزان کاهش محاسبات حاصل شده با روش پیشنهادی با روش کنترل پیش بین مرسوم در یک جدول مورد مقایسه قرار گرفته است. عملکرد حالت ماندگار روش پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. ردیابی توان‌های اکتیو و راکتیو و ولتاژ و جریان فاز a استاتور و DFIG به ترتیب در قسمت‌های a و b شکل ۲ نشان داده شده است.

که به صورت حطی با افزایش سرعت توربین و ژنراتور دامنه جریان نیز افزایش پیدا می کند و دامنه ولتاژ ثابت است. در این شرایط نشان می- دهد. لازم به ذکر است که در هر دو حالت ماندگار و تغییرات سرعت باد، عملکرد ردیابی روش پیشنهادی تغییر چندانی در مولفه های ردیابی از قبیل پاسخ دینامیکی و یا رپیل توان و جریان در مقایسه با روش کنترل پیش بین مرسوم ایجاد نمی کند و تفاوت آنها در مدت زمان انجام محاسبات و به عبارتی میزان بار محاسباتی فرایند بهینه سازی در شرایط یکسان است. جدول ۱ مقایسه مدت زمان لازم برای شبیه سازی شکل ۳ را با هر دو روش کنترل پیش بین پیشنهادی و کنترل پیش بین مرسوم نشان می دهد.

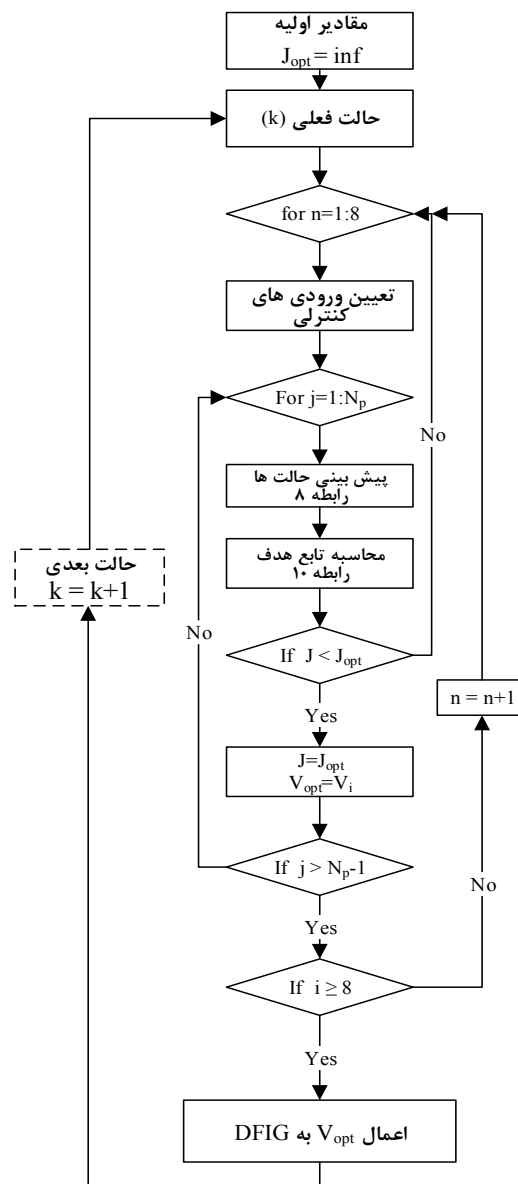
جدول ۱: مشخصات کنترلی روش های مورد مقایسه

سیستم کنترلی	کران پیش بین (N_p)	زمان محاسبات بر حسب ثانیه
کنترل پیش بین مرسوم	۶	۸۵/۳۰۲
روش کنترل پیش بین پیشنهادی	۳	۳۶/۶۱۹

به منظور مقایسه صحیح شرایط ردیابی و تابع هدف و همچنین زمان نمونه برداری برای هر دو مورد یکسان در نظر گرفته شده است (در روش پیشنهادی با کران پیش بین برابر با ۳، تا لحظه ۶ پیش بینی خواهد شد).

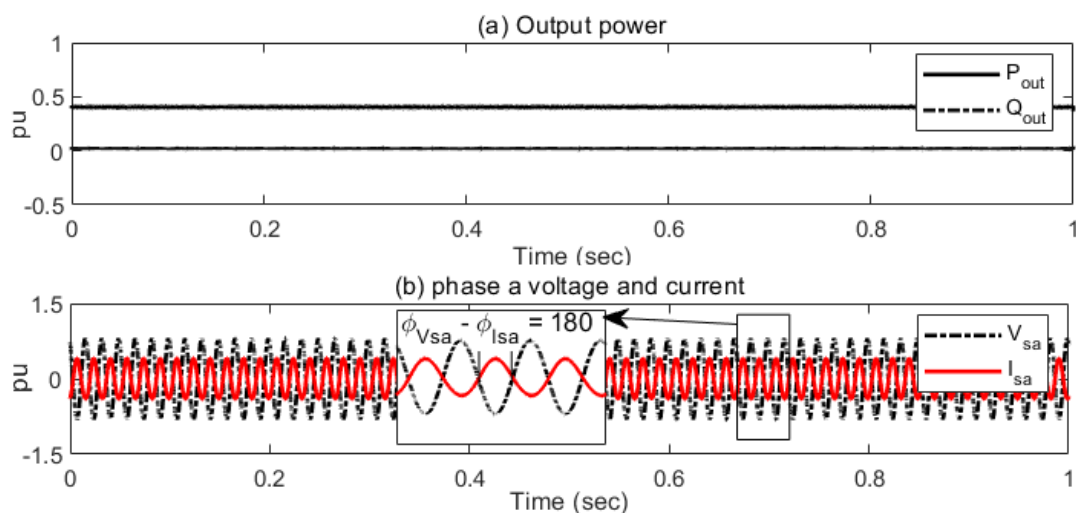
نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، یک روش کنترلی مبتنی بر کنترل پیش بین مدل برای ژنراتور القایی دوتحریکه متصل به توربین بادی ارائه شد. از مهم ترین ویژگی های روش پیشنهادی می توان به استفاده از مدل گسسته زمان با زمان نمونه برداری متغیر در مدل پیش بینی و همچنین استفاده از الگوریتم افزایشی در ساختار کنترل پیش بین اشاره کرد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی در کنار عملکرد ردیابی دقیق توان های اکتیو و راکتیو در شرایط ماندگار و شرایط تغییرات سرعت باد، کاهش ۵۷ درصدی زمان محاسبات را در روش پیشنهادی نتیجه می دهد. این کاهش، بیانگر فراهم شدن شرایط بهتر برای پیاده سازی روش های مبتنی بر کنترل پیش بین در عمل است.

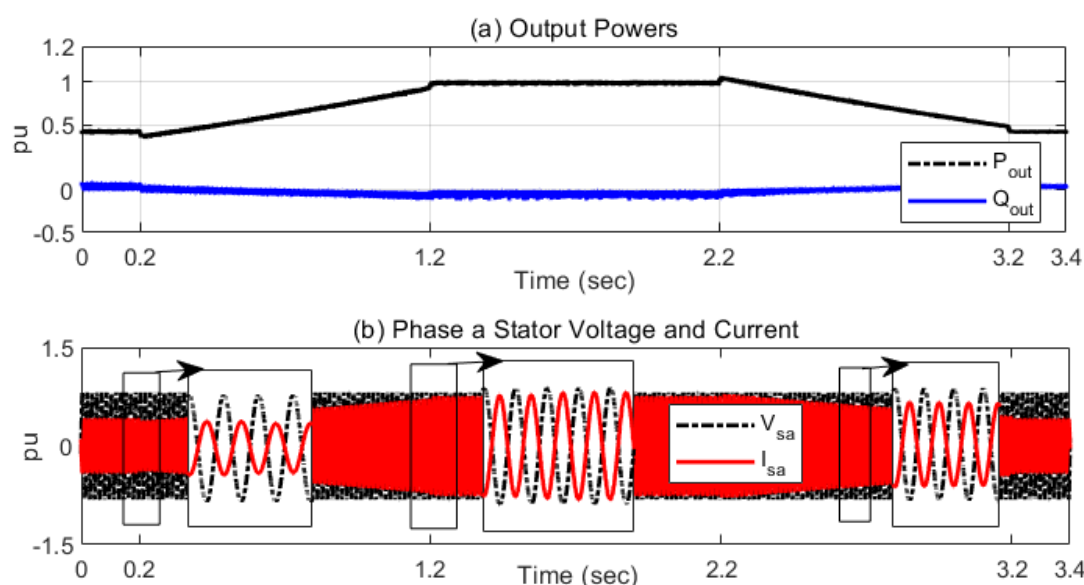


شکل ۱: فلوچارت الگوریتم کنترل پیش بین پیشنهادی

از روی این شکل واضح است که ماشین القایی دو تحرکه در ضریب توان واحد در حال تولید در شرایط ماندگار است. شکل ۳ عملکرد دینامیکی روش پیشنهادی را در شرایط تغییرات سرعت باد نشان می دهد. در این حالت سرعت باد ابتدا، ۹ متر بر ثانیه است و سپس رفته رفته افزایش پیدا می کند به طوری که در مدت زمان یک ثانیه به ۱۲ متر بر ثانیه می رسد و یک ثانیه در این حالت باقی می ماند و در ادامه با یک روند کاهشی مشابه، به ۹ متر بر ثانیه بر می گردد. شکل ۳ a، عملکرد ردیابی دقیق توان های اکتیو و راکتیو DFİG را به کمک روش پیشنهادی نشان می دهد. مشابه حالت قبل، شکل ۳ b، ولتاژ و جریان فاز a استاتور را نشان می دهد



شکل ۲: عملکرد حالت ماندگار ژنراتور القایی دوتحریکه با روش کنترل پیش بین پیشنهادی. (a) خروجی توان‌های اکتیو و راکتیو و (b) ولتاژ و جریان فاز a استاتور



شکل ۳: عملکرد ژنراتور القایی دوتحریکه با روش کنترل پیش بین پیشنهادی در شرایط تغییرات سرعت باد. (a) خروجی توان‌های اکتیو و راکتیو و (b) ولتاژ و جریان فاز a استاتور

مراجع و منابع

- [1] A. Younesi, S. Tohidi, and H. Yousefi, "Efficiency maximizing of doubly fed induction generator with considering core loss and reactive power control by optimized model reference adaptive method," *TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 47, pp. 791-803, 2017.
- [2] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 143, pp. 231-241, 1996.
- [3] J. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 800-802, 2004.
- [4] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, pp. 194-204, 2003.
- [5] X. Wang and D. Sun, "Three-Vector-Based Low-Complexity Model Predictive Direct Power Control Strategy for Doubly Fed Induction Generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 773-782, 2017.
- [6] G. Abad, M. Á. Rodríguez, and J. Poza, "Two-Level VSC Based Predictive Direct Torque Control of the Doubly Fed Induction Machine With Reduced Torque and Flux Ripples at Low Constant Switching Frequency," *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 1050-1061, 2008.
- [7] J. H. Lee, "Model predictive control: Review of the three decades of development," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 9, p. 415, June 04 2011.
- [8] S. Vazquez, J. I. Leon, L. G. Franquelo, J. Rodriguez, H. A. Young, A. Marquez, *et al.*, "Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, pp. 16-31, 2014.
- [9] Y. Zhang and H. Yang, "Model Predictive Torque Control of Induction Motor Drives With Optimal Duty Cycle Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 6593-6603, 2014.
- [10] Y. Zhang and H. Yang, "Generalized Two-Vector-Based Model-Predictive Torque Control of Induction Motor Drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 3818-3829, 2015.
- [11] Y. Zhang, Z. Li, T. Wang, J. Hu, and J. Zhu, "Predictive direct torque and flux control of doubly fed induction generator with switching frequency reduction for wind energy applications," in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1-6.
- [12] Y. Zhang, J. Hu, and J. Zhu, "Three-Vectors-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 3485-3500, 2014.
- [13] X. Liu and X. Kong, "Nonlinear Model Predictive Control for DFIG-Based Wind Power Generation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, pp. 1046-1055, 2014.
- [14] R. Errouissi, A. Al-Durra, S. M. Mueen, S. Leng, and F. Blaabjerg, "Offset-Free Direct Power Control of DFIG Under Continuous-Time Model Predictive Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 2265-2277, 2017.
- [15] M. Wang, Y. Shi, Z. Zhang, M. Shen, and Y. Lu, "Synchronous Flux Weakening Control With Flux Linkage Prediction for Doubly-Fed Wind Power Generation Systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5463-5470, 2017.
- [16] G. D. Marques and M. F. Iacchetti, "Minimization of Torque Ripple in the DFIG-DC System Via Predictive Delay Compensation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, pp. 103-113, 2018.
- [17] M. E. Zarei, C. V. Nicolás, and J. R. Arribas, "Improved Predictive Direct Power Control of Doubly Fed Induction Generator During Unbalanced Grid Voltage Based on Four Vectors," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, pp. 695-707, 2017.
- [18] P. F. C. Gonçalves, S. M. A. Cruz, M. B. Abadi, L. M. A. Caseiro, and A. M. S. Mendes, "Fault-tolerant predictive power control of a DFIG for wind energy applications," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, pp. 969-980, 2017.
- [19] C. Cheng and H. Nian, "Low-Complexity Model Predictive Stator Current Control of DFIG Under Harmonic Grid Voltages," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, pp. 1072-1080, 2017.
- [20] P. Kou, D. Liang, J. Li, L. Gao, and Q. Ze, "Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIG Wind Turbines," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. PP, pp. 1-10, 2017.
- [21] J. Rodriguez and P. Cortes, "Model Predictive Control," in *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 31-39.
- [22] C. S. Lim, N. A. Rahim, W. P. Hew, and E. Levi, "Model Predictive Control of a Two-Motor Drive With Five-Leg-Inverter Supply," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 54-65, 2013.
- [23] F. Barrero, J. Prieto, E. Levi, R. Gregor, S. Toral, M. J. Duran, *et al.*, "An Enhanced Predictive Current Control Method for Asymmetrical Six-Phase Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 3242-3252, 2011.
- [24] J. Rodriguez, M. P. Kazmierkowski, J. R. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. A. Young, *et al.*, "State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 1003-1016, 2013.
- [25] M. M. Vayeghan and S. A. Davari, "Torque ripple reduction of DFIG by a new and robust predictive torque control method," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, pp. 1345-1352, 2017.
- [26] T. Geyer, "Predictive Control with Long Horizons," in *Model Predictive Control of High Power Converters and Industrial Drives*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 195-216.
- [27] A. Younesi, S. Tohidi, M. R. Feyzi, and M. Baradarannia, "An improved nonlinear model predictive direct speed control of permanent magnet synchronous motors," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, p. e2535, 2018.