

کنترل پیش‌بین با رویکرد بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور مزارع بادی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی و SSSC

محسن دارابیان^۱، دانشجوی دکتری برق، ابوالفضل جلیوند^۲، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - m.darabian@znu.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - ajalilvand@znu.ac.ir

چکیده: هدف اصلی این مقاله به‌کارگیری استراتژی کنترل پیش‌بین با رویکرد کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در راستای بهبود پایداری یک سیستم قدرت در حضور مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) است. در این راستا از سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی (SCESS) جهت کنترل توان اکتیو در مبدل سمت شبکه و حفظ تعادل ولتاژ لینک dc و از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) به‌منظور کنترل پخش توان و کاهش نوسانات فرکانس پایین در خط منتهی به شین بی‌نهایت استفاده شده است. استراتژی مطرح‌شده مبتنی بر کنترل پیش‌بین تابعی بوده که می‌تواند به‌صورت هم‌زمان علاوه بر کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو مبدل سمت روتور، در طراحی کنترل‌کننده میرایی برای SCESS و SSSC به‌کار گرفته شود. در کنترل پیش‌بین تابعی به‌منظور کاهش بار محاسباتی در انتخاب مسیرهای ورودی از توابع لاگر و همچنین از داده‌های وزنی جهت کاهش زمان نمونه‌برداری در افق پیش‌بینی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای این کنترل‌کننده با روش دیگر شامل کنترل پیش‌بین مدل و کنترل‌کننده PI مقایسه شده و برتری آن در بهبود پایداری به‌وضوح نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری سیستم قدرت، کنترل پیش‌بین، جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، توربین بادی.

Predictive Control for Improving Power System Oscillation Damping in Presence of Wind Farms using Super Capacitor Energy Storage System (SCESS) and SSSC

M. Darabian, PhD. Student¹, A. Jalilvand, Associate Professor²

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, m.darabian@znu.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, ajalilvand@znu.ac.ir

Abstract: The main objective of this paper is to employ predictive control strategy with the approach of active and reactive power control to improve power system stability in presence of wind farms based on Doubly Fed Induction Generator (DFIG). In this regard, the Super Capacitor Energy Storage System (SCESS) is used to control active power in the Grid Side Converter (GSC) as well as balance the dc-link voltage and the Static Synchronous Series Compensator (SSSC) is employed to control power flow and reduce low frequency oscillations in the line leading to the infinite bus. The proposed strategy based on the predictive control is functional and can be simultaneously used to control the active and reactive power of the Rotor Side Converter (RSC) as well as design the damping controller for SCESS and SSSC. In order to reduce computational complexity in selecting input paths, the Laguerre functions are used. Moreover, the exponential data weighting are used to reduce sampling time in the prediction horizon. Simulation results for the functional model predictive control is compared with the other two methods, model predictive control and PI controller and its superiority in improving power system stability is confirmed.

Keywords: Power system stability, predictive control, static synchronous series compensator (SSSC), super capacitor energy storage system (SCESS), doubly fed induction generator (DFIG), wind turbine.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۹/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۱/۲۳ و ۱۳۹۵/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱

نام نویسنده مسئول: ابوالفضل جلیوند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - کیلومتر ۶ جاده تبریز - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

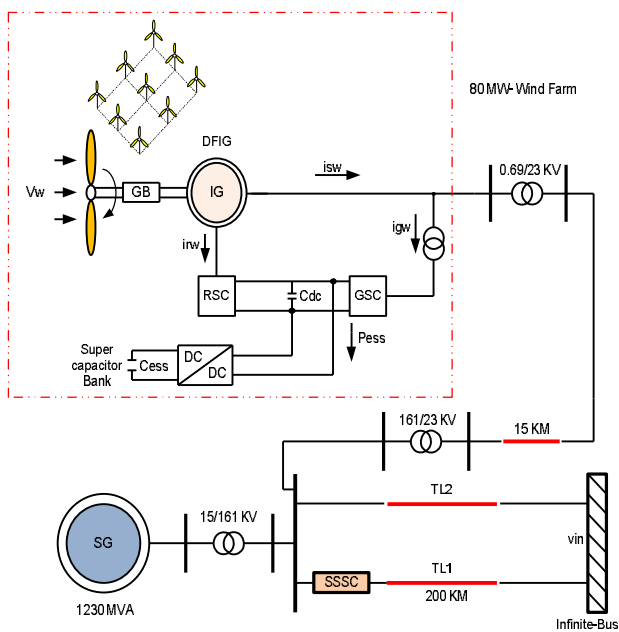
امروزه از انرژی باد به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تولید انرژی الکتریکی در سرتاسر دنیا استفاده می‌شود. اما به دلیل ماهیت نوسانی بودن آن، استفاده از این نوع انرژی باعث نوسانی شدن توان تولیدی مزارع بادی در جهت تأمین انرژی موردنیاز بار در شبکه‌های الکتریکی می‌شود. بنابراین وجود چنین نوساناتی از دید پایداری و کیفیت توان در یک سیستم قدرت غیرقابل اغماض است [۱-۲]. این امر در تمامی انواع توربین‌های بادی سرعت ثابت و سرعت متغیر می‌تواند موردتوجه باشد. در این راستا سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS^۱) و ادوات FACTS می‌توانند به‌عنوان جبران‌ساز بسیار مفید در جهت کاهش نوسانات و افزایش میرایی در سیستم‌های قدرت به کار برده شوند [۳-۴].

ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG^۲) به دلیل هزینه کم مبدل‌ها و کنترل مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو یکی از متداول‌ترین انواع توربین‌های بادی سرعت متغیر به شمار می‌آید [۵]. روتور این ژنراتور از طریق یک مبدل دوجهنه پشت‌به‌پشت و استاتور آن به‌صورت مستقیم به شبکه متصل می‌شود. به‌منظور کنترل این مبدل دوجهنه از سه حلقه کنترلی به نام‌های مبدل سمت شبکه (GSC^۳)، مبدل سمت روتور (RSC^۴) و یک حلقه کنترلی برای خازن لینک DC که این دو مبدل را به یکدیگر متصل می‌سازد استفاده می‌شود [۶]. اخیراً مطالعات گسترده‌ای بر روی سیستم‌های کنترلی DFIG در راستای پایداری مطرح شده است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: تحلیل حساسیت [۶]، تحلیل پایداری سیگنال کوچک [۸-۶]، تحلیل مقادیر ویژه [۹]، روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی در هر یک از مبدل‌های DFIG [۱۰-۱۲]، روش فیدبک حالت [۱۳] و روش کنترل مقاوم H_2 / H_∞ [۱۴]. هر یک از این روش‌ها به‌منظور خاصی در جهت بهبود میرایی نوسانات و کنترل توان‌های یک توربین بادی مبتنی بر DFIG، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی کننده PI در هر یک از مبدل‌های ژنراتور القایی توسط الگوریتم‌های هوشمند بهینه می‌شوند تا خروجی کنترل‌کننده با کم‌ترین خطا به مبدل موردنظر اعمال شود. مشکل جدی کنترل‌کننده‌های PI وابستگی آن‌ها به نقطه کار و حساسیت نسبت به تغییر شرایط سیستم است. در برخی منابع جهت حل این مشکل از روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی و منطق فازی استفاده شده است [۱۵-۱۶] که از پیچیدگی و معایب خاص خود برخوردار است.

از جمله روش‌های کاهش نوسانات در توان خروجی DFIG‌ها استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی (SCSS^۵) است [۱۷]. در این سیستم‌ها در صورتی که توربین بادی تحت تغییرات شدید باد دچار نوسان شود می‌توان توان موردنیاز شبکه را به‌صورت خیلی ساده توسط یک ابرخازن و یک مبدل DC-DC جبران کرد [۱۸]. از دیگر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی که در باس AC به‌منظور جبران توان راکتیو به کار برده می‌شوند می‌توان به سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

چرخ طیار (FESS^۶) [۱۹-۲۰] و ابرسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی (SMES^۷) اشاره کرد [۲۱-۲۲]. در مطالعات پایداری برای سیستم قدرت، یکی از روش‌هایی که برای کاهش نوسانات فرکانس پایین (LFO^۸) به کار برده می‌شود طراحی کنترل‌کننده میرایی برای پایدارسازی سیستم قدرت (PSS^۹) و یا ادوات FACTS است. در این راستا جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC^{۱۰}) یکی از انواع ادوات FACTS نسل جدید است که به‌صورت سری در خط انتقال قرار می‌گیرد و با توجه به ساختار خود می‌تواند شارش توان در خط انتقال را از خازنی به سلفی تبدیل کند [۲۳-۲۴]. روش‌های بسیاری برای طراحی کنترل‌کننده مناسب در SSSC مطرح شده است [۲۵-۲۶]. روش کنترل مقاوم غیرخطی به‌منظور بهبود میرایی و افزایش پایداری گذرا [۲۵]، روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند جهت بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌فاز - پس‌فاز در طراحی هماهنگ PSS و ادوات جبران‌ساز [۲۷] از جمله روش‌هایی هستند که برای افزایش پایداری در سیستم‌های قدرت توسط ادوات FACTS به چالش کشیده شده‌اند.

در صورت بروز اغتشاشات چندگانه در یک سیستم قدرت و با وجود عدم قطعیت‌های ناشی از یک سیستم بادی، به روشی نیاز است که بتواند پایداری سیستم را تحت تمامی شرایط تضمین کند. به‌عبارت‌دیگر این روش باید بتواند علاوه بر اعمال قیود حاکم بر سیستم، به‌صورت هم‌زمان چندین پارامتر را با کم‌ترین خطای خروجی کنترل کند، تا بتوان از پایداری سیستم موردنظر اطمینان حاصل کرد. در این میان به کارگیری کنترل پیش‌بین به‌عنوان یک ابزار کنترلی بسیار قدرتمند جهت برآوردن خواسته‌های فوق ارائه می‌گردد. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل یکی از روش‌های کنترلی پیشرفته در زمینه فعالیت‌های صنعتی و تحقیقاتی به‌حساب می‌آید [۲۸]. در این روش کنترلی با استفاده از مدل فرایند و مینیمم کردن یک تابع هدف سیگنال‌های کنترلی قابل قبولی به دست می‌آید که از آن برای طراحی پارامترهای حلقه کنترلی استفاده می‌شود. از کاربردهای MPC^{۱۱} در حل مسائل مربوط به پایداری سیستم‌های قدرت می‌توان به انتخاب سیگنال‌های کنترلی مناسب برای پایدارسازی سیستم قدرت [۲۹]، طراحی کنترل‌کننده میرایی برای یک سیستم HVDC^{۱۲} [۳۰]، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در یک توربین بادی با مدل‌سازی معادلات در فضای حالت [۳۱-۳۲]، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در یک ریزشبه‌جهت هماهنگی یک باتری و توربین بادی با در نظر گرفتن سرعت باد و مصرف شبکه [۳۳] و پیش‌بینی توان خروجی یک ریزشبه‌جهت کنترل ولتاژ و توان راکتیو در یک سیستم توزیع ۳۳ شینه اشاره کرد [۳۴]. در مراجع مختلف روش‌های زیادی از استراتژی کنترل پیش‌بین مطرح شده که تمامی آن‌ها متکی بر مدل هستند. در این روش‌ها سعی بر این بوده با به‌کارگیری برخی از روابط ریاضی و الگوریتم‌های هوشمند روند اجرای حل مسائل مربوط به مدل پیش‌بین را بهبود دهند. در این راستا مدل پیش‌بین غیرخطی با افست آزاد (Offset-Free) جهت



شکل ۱: دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت تحت مطالعه

معادلات دینامیکی مدل دوماحوری برای ازمین ژنراتور سنکرون توسط روابط زیر قابل بیان است [۳۹]:

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T'_{doi}} [-E'_{qi} + E_{fdi} + (X_{di} - X'_{di})I_{di}] \quad (1)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = \frac{1}{T'_{qoi}} [-E'_{di} - (X_{qi} - X'_{qi})I_{qi}] \quad (2)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{\tau_{ji}} [T_{mi} - [I_{di}E'_{di} + I_{qi}E'_{qi} - (L'_{qi} - L'_{di})I_{di}I_{qi} + D_i\omega_i]] \quad (4)$$

۲-۲- مدل ژنراتور القایی دوسوتغذیه

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است در سیستم توربین بادی مبتنی بر DFIG، مبدل سمت روتور (RSC) و مبدل سمت شبکه (GSC) از طریق یک لینک DC به صورت پشت‌به‌پشت با یکدیگر ارتباط دارند. وظیفه این لینک DC حفظ تعادل توان بین دو مبدل است. در این مقاله از تکنیک برداری برای مدل‌سازی ژنراتور القایی جهت کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو استفاده شده است [۶]. به دلیل تمرکز این مقاله بر کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو، روابط مربوط به کنترل‌کننده‌های RSC و GSC به صورت کامل بیان شده است. مراجع [۶-۹]، اطلاعات جامع‌تری در رابطه با نحوه مدل‌سازی کنترل‌کننده‌های مربوط به DFIG را ارائه می‌دهند.

طراحی جبران‌ساز استاتیکی وار (SVC^[۳۵])، کنترل پیش‌بین مقاوم [۳۶] و کنترل پیش‌بین تابعی [۳۷-۳۸] جزو روش‌های پیشرفته‌تر مدل پیش‌بین هستند که نیازمند اجرای روابط ریاضی پیشرفته در حوزه مهندسی کنترل می‌باشند.

در این مقاله از کنترل پیش‌بین مدل تابعی (FMPC^[۳۴]) به منظور افزایش پایداری در یک سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با رویکرد کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در توربین بادی استفاده شده است. کنترل توان اکتیو در مبدل سمت شبکه با استفاده از یک کنترل‌کننده میرایی در ساختار SCESS انجام شده است. این ساختار به گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر حفظ ولتاژ لینک DC توانایی کنترل توان اکتیو در GSC را داشته باشد. کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در مبدل سمت روتور با رویکرد انتخاب سیگنال‌های کنترلی مناسب برای اینورتر RSC اتخاذ شده است. علاوه بر همه این‌ها جهت کاهش نوسانات فرکانس پایین از کنترل‌کننده میرایی در ساختار SSSC به گونه‌ای استفاده شده که بتواند توان انتقالی در خط را کنترل کند و در نتیجه میرایی سیستم قدرت را افزایش دهد. به طور خلاصه نوآوری‌های مقاله حاضر تحت عناوین زیر قابل بیان است:

- استفاده از کنترل پیش‌بین مدل تابعی در راستای بهبود پایداری سیستم تحت مطالعه.
- طراحی کنترل‌های میرایی برای SCESS و SSSC به منظور کنترل توان‌های اکتیو.
- کنترل توان راکتیو مبدل سمت روتور با استخراج رابطه ریاضی در فضای حالت و اعمال آن به کنترل پیش‌بین مدل تابعی.

در ادامه مقاله، در بخش دوم به مدل‌سازی سیستم قدرت شامل: معادلات دینامیکی ژنراتور سنکرون، معادلات مربوط به مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور در DFIG، معادلات مربوط به طراحی کنترل‌کننده میرایی در SCESS و SSSC، پرداخته شده است. بخش سوم شامل معرفی و مدل‌سازی استراتژی پیش‌بین و تطبیق آن با سیستم قدرت است. در بخش چهارم شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی عناصر مربوط به سیستم تحت مطالعه

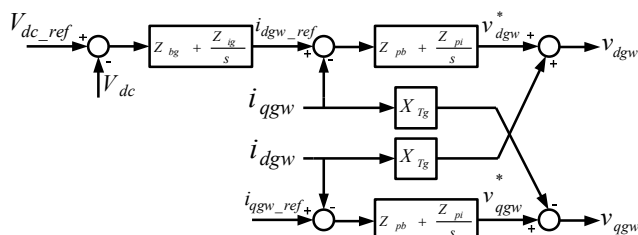
۲-۱- مدل ژنراتور سنکرون

در این قسمت به منظور تحلیل معادلات دینامیکی ژنراتور سنکرون برای سیستم تحت مطالعه از مدل دوماحوری استفاده شده است [۳۹]. در این مدل از تأثیرات راکتانس‌های زیرگذرا صرف‌نظر شده و فقط راکتانس‌های گذرای ژنراتور سنکرون در مدل‌سازی به کار گرفته می‌شوند. مدل سیستم تحریک شامل AVR-PSS از نوع IEEE-1 بوده و پارامترهای مربوط به آن در قسمت ضمیمه آورده شده است. در شکل ۱ نمودار تک‌خطی سیستم تحت مطالعه نشان داده شده است.

$$\begin{cases}
 \dot{u}_1 = \omega_{rw_ref} - \omega_{rw} \\
 i_{qrw_ref} = Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) + Z_{i1}u_1 \\
 \dot{u}_2 = i_{qrw_ref} - i_{qrw} = Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) \\
 + Z_{i1}u_1 - i_{qrw} \\
 \dot{u}_3 = Q_{sw_ref} - Q_{sw} \\
 i_{drw_ref} = Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) + Z_{i3}u_3 \\
 \dot{u}_4 = i_{drw_ref} - i_{drw} = Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) \\
 + Z_{i3}u_3 - i_{drw} \\
 v_{qrw} = Z_{q2}(Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) + Z_{i1}u_1 - i_{qrw}) \\
 + Z_{i2}u_2 + s_{rw}\omega_s L_{mm}i_{dsw} + s_{rw}\omega_s L_{rr}i_{qrw} \\
 v_{drw} = Z_{q2}(Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) + Z_{i3}u_3 - i_{drw}) \\
 + Z_{i2}u_4 - s_{rw}\omega_s L_{mm}i_{qsw} - s_{rw}\omega_s L_{rr}i_{drw}
 \end{cases} \quad (5)$$

۴-۲- مدل ریاضی برای GSC

مهم‌ترین وظیفه در GSC، حفظ ولتاژ لینک DC در مقداری ثابت و کنترل توان رکتیو شبکه است. در شکل ۴ بلوک دیاگرام مبدل سمت شبکه با جزئیات کامل نشان داده شده است. با توجه به این شکل از مقایسه سیگنال مرجع ولتاژ DC (V_{dc_ref}) با مقدار اندازه‌گیری شده (V_{dc}) توسط یک کنترل‌کننده PI سیگنال مرجع جریان در محور d تولید می‌شود. سپس از مقایسه سیگنال‌های مرجع جریان (i_{qgw_reg} , i_{dqw_reg}) با مقادیر اندازه‌گیری شده (i_{qgw} , i_{dqw}) پس از گذر از دو کنترل‌کننده PI سیگنال‌های v_{dqw}^* و v_{qgw}^* به دست می‌آید. این سیگنال‌های کنترلی پس از جمع شدن با سیگنال‌های جریان، سیگنال‌های (v_{qgw} , v_{dqw}) را جهت ارسال به PWM تولید می‌کنند. در نهایت از پالس‌هایی که توسط PWM حاصل می‌شود جهت اعمال به سوئیچینگ اینورتر استفاده خواهد شد.

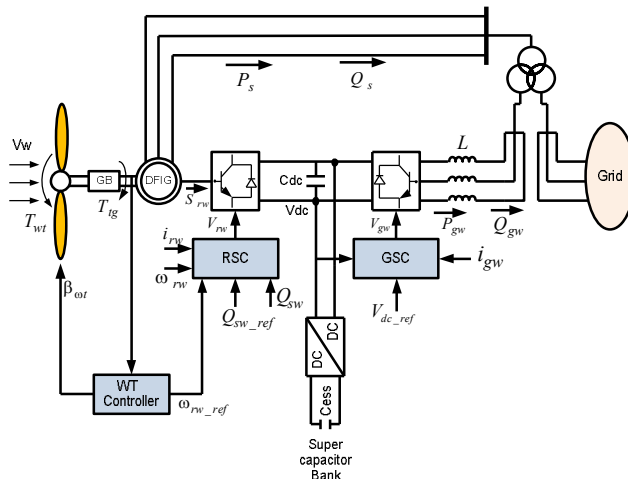


شکل ۴: دیاگرام بلوکی برای مبدل سمت شبکه

معادلات توصیف‌کننده مبدل سمت شبکه توسط رابطه زیر بیان

می‌شود [۶، ۹]:

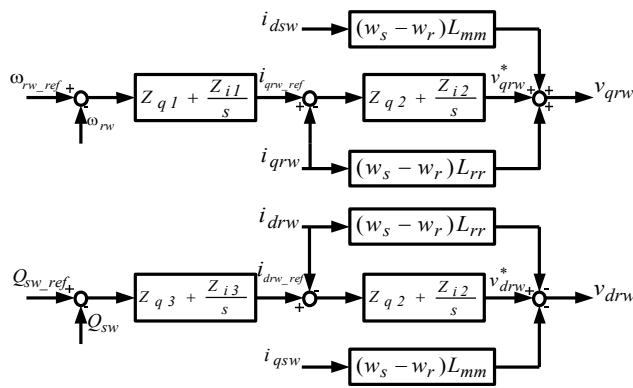
$$\begin{cases}
 \dot{u}_5 = V_{dc_ref} - V_{dc} \\
 i_{dqw_ref} = -Z_{bg}\Delta V_{dc} + Z_{ig}u_5 \\
 \dot{u}_6 = i_{dqw_ref} - i_{qgw} = -Z_{bg}\Delta V_{dc} + Z_{ig}u_5 - i_{qgw} \\
 \dot{u}_7 = v_{qgw_ref} - i_{qgw} \\
 \Delta v_{dqw} = Z_{pb}\dot{u}_6 + Z_{pi}u_6 = \\
 Z_{pb}(-Z_{bg}\Delta V_{dc} + Z_{ig}u_5 - i_{qgw}) + Z_{pi}u_6 \\
 \Delta v_{qgw} = Z_{pb}\dot{u}_7 + Z_{pi}u_7 = \\
 Z_{pb}(i_{qgw_ref} - i_{qgw}) + Z_{pi}u_7
 \end{cases} \quad (6)$$



شکل ۲: ساختار DFIG به همراه سیستم ذخیره‌ساز ابرخازنی

۳-۲- مدل ریاضی برای RSC

مهم‌ترین وظیفه مبدل سمت روتور (RSC)، کنترل توان اکتیو و رکتیو خروجی DFIG، استخراج بیشینه توان از باد و تأمین توان رکتیو موردنیاز ژنراتور القایی است. در این کنترل‌کننده توان اکتیو توسط مؤلفه v_{qrw} و ولتاژ توسط مؤلفه v_{drw} کنترل می‌شود.



شکل ۳: دیاگرام بلوکی مبدل سمت روتور

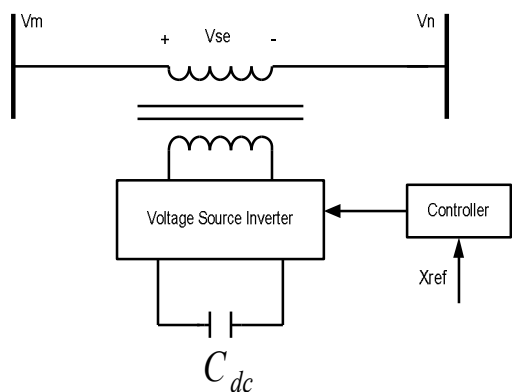
همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، کنترل ولتاژ توسط کنترل توان رکتیو با اندازه‌گیری Q_{sw} و کنترل توان اکتیو با اندازه‌گیری سرعت توربین ω_{rw} صورت می‌پذیرد. از مقایسه این سیگنال‌های کنترلی با سیگنال‌های مرجع توسط یک کنترل‌کننده PI برای هر یک از پارامترها، سیگنال‌های مرجع (i_{qrw_ref} , i_{drw_ref}) تولید می‌شود. سپس سیگنال‌های مرجع در محور d-q با مقایسه سیگنال مرجع جریان، سیگنال خطایی تولید می‌کنند که از طریق دو کنترل‌کننده PI، سیگنال‌های v_{dqw}^* و v_{qgw}^* به دست می‌آید. این سیگنال‌های پس از تقویت توسط دو مؤلفه دیگر از سیگنال‌های جریان، سیگنال‌های (v_{qgw} , v_{drw}) را برای ارسال به PWM تولید می‌کنند. در نهایت PWM پالس‌های مناسبی را جهت اعمال کلیدزنی به اینورتر ارسال می‌کند.

معادلات مربوط به RSC به صورت روابط زیر بیان می‌شود [۶، ۹]:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_{gw}}{dt} = P_{gw_ref} - P_{gw} \\ \frac{\Delta P'_{gw}}{dt} = (P_{gw_ref} - P_{gw}) - \frac{\Delta P_{gw}}{T_w} \\ \frac{dV_{CS}}{dt} = K_C((P_{gw_ref} - P_{gw}) - \frac{\Delta P'_{gw}}{T_w}) + K_D \Delta P'_{gw} \\ \frac{d\Delta\gamma_s}{dt} = \frac{1}{T_p} [K_P(V_{dc_SC}^* - V_{dc_SC} - V_{CS}) - \Delta\gamma_s] \end{cases} \quad (8)$$

۲-۶- مدل سازی SSSC

از SSSC می‌توان به‌عنوان یک جبران‌ساز توان راکتیو بر اساس اینورتر منبع ولتاژ به‌صورت سری در خط انتقال استفاده نمود. به عبارتی از این جبران‌ساز می‌توان در دو مد خازنی و سلفی بهره‌برداری کرد. ساختار مداری این نوع FACTS در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: دیاگرام تک‌خطی از یک SSSC

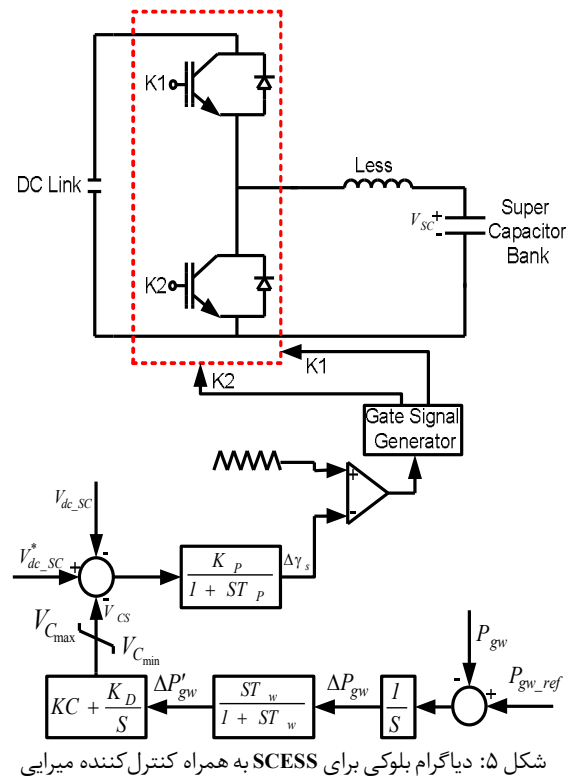
در این ساختار از یک اینورتر منبع ولتاژ، یک ترانسفورماتور سری، یک خازن با ظرفیت C_{dc} و یک بلوک کنترلی استفاده شده است. با استفاده از قاب مرجع سنکرون می‌توان ولتاژ تزریقی سری در SSSC را توسط روابط زیر در دو محور d-q توصیف نمود [۲۳]:

$$\begin{cases} v_{ds} = m_c Z_{inv} V_{dc_SSSC} \cos(\beta_s) \\ v_{qs} = m_c Z_{inv} V_{dc_SSSC} \sin(\beta_s) \end{cases} \quad (9)$$

معادله دینامیکی خازن لینک DC به‌منظور حفظ تعادل توان در سمت dc و ac توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$V_{dc_SSSC} = \frac{1}{C_{dc}} [m_c Z_{inv} (i_d \cos \beta_s + i_q \sin \beta_s)] \times \frac{1}{C_{dc}} \left(-\frac{V_{dc_SSSC}}{R_{dc}} \right) \quad (10)$$

بلوک دیاگرام کنترلی SSSC برای مد خازنی به‌همراه کنترل‌کننده میرایی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ با اضافه شدن یک سیگنال کنترلی مبتنی بر X_F می‌توان جاری در خط انتقال را به‌منظور کاهش نوسانات فرکانس پایین کنترل نمود.



شکل ۵: دیاگرام بلوکی برای SCESS به‌همراه کنترل‌کننده میرایی

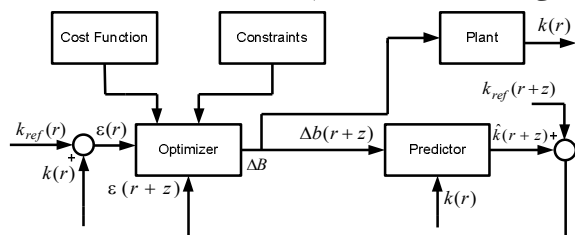
۲-۵- کنترل‌کننده مبدل SCEES

در این مقاله به‌منظور اطمینان کامل از حفظ ولتاژ لینک dc از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی (SCEES) استفاده شده است. علاوه‌براین، یک کنترل‌کننده میرایی در SCEES طراحی شده که می‌تواند تحت تغییرات شبکه، توان اکتیو شبکه را به‌خوبی کنترل کند. ساختار این مبدل همان‌طوری که در شکل ۵ نشان داده شده شامل یک بانک خازنی و یک مبدل DC/DC دوکلیدی است که از طریق لینک DC به DFIG متصل می‌شود. بهره‌برداری از مبدل dc/dc بسته به کلیدهای K_1 , K_2 می‌تواند در مدهای boost و buck صورت پذیرد. اگر کلید K_1 باز باشد بهره‌برداری در مد boost انجام می‌شود و اگر کلید K_2 باز باشد بهره‌برداری در مد buck صورت می‌پذیرد. در مد buck وقتی کلید K_1 بسته است به نسبت ولتاژ بانک خازنی و ولتاژ لینک DC می‌توان سهم روشن بودن کلید K_1 را به‌صورت S_1 توسط رابطه زیر تعریف کرد [۱۷]:

$$S_1 = \frac{V_{sc}}{V_{dc}} \quad (V)$$

همچنین در مد boost هنگامی که کلید K_2 بسته است S_2 به‌صورت $1-S_1$ تعریف می‌شود. در این مقاله نسبت ولتاژ بانک خازنی به ولتاژ لینک DC برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین زمان روشن بودن S_1 برابر با ۰/۵ است. معادلات توصیف‌کننده سیستم SCEES به‌صورت روابط زیر قابل بیان است:

مسئله، تابع هدف و خروجی سیستم پیش‌بینی را می‌توان به سیستم بهینه‌سازی اعمال کرد تا در هر لحظه از زمان نمونه‌برداری بتوان خروجی مناسب‌تری برای سیستم به دست آورد.



شکل ۸: ساختار کنترلی برای MPC

در این مقاله با توجه به اینکه از استراتژی کنترلی پیش‌بین به صورت چندهدفه استفاده شده است لذا مدل به کاررفته برای این استراتژی در فضای حالت بوده تا بتوان به صورت دقیق اهداف موردنظر را دنبال کرد. بنابراین نقطه شروع حل مسئله را با بیان معادلات کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در فضای حالت به صورت زیر دنبال می‌کنیم:

$$\begin{cases} x(z+1) = F_k x(z) + G_k b(z) + H_k c(z) \\ k(z) = P_k x(z) \end{cases} \quad (12)$$

انتخاب تابع هدف طوری است که خروجی‌های آینده در افق پیش‌بینی بتوانند به صورت هم‌زمان سیگنال مرجع را به درستی ردیابی کنند و تلاش کنترلی موردنیاز تا حد امکان کم باشد. بنابراین به منظور دستیابی به اهداف موردنظر تابع هدف کنترل پیش‌بین را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$F_{fit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z (k'(r+z) - k_{ref}(r+z))^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z \Delta b(r+z)^2 \quad (13)$$

با توجه به رابطه فوق، بردار پیش‌بینی که برای خروجی سیستم در نظر گرفته می‌شود به صورت یک ماتریس $1 \times m_a$ تعریف می‌شود که در آن m_a افق پیش‌بینی نامیده می‌شود. علاوه بر این Δb نیز به صورت یک ماتریس $1 \times m_b$ است که در آن m_b افق کنترلی نامیده می‌شود.

۳-۱- قیود اعمالی در کنترل پیش‌بین مدل

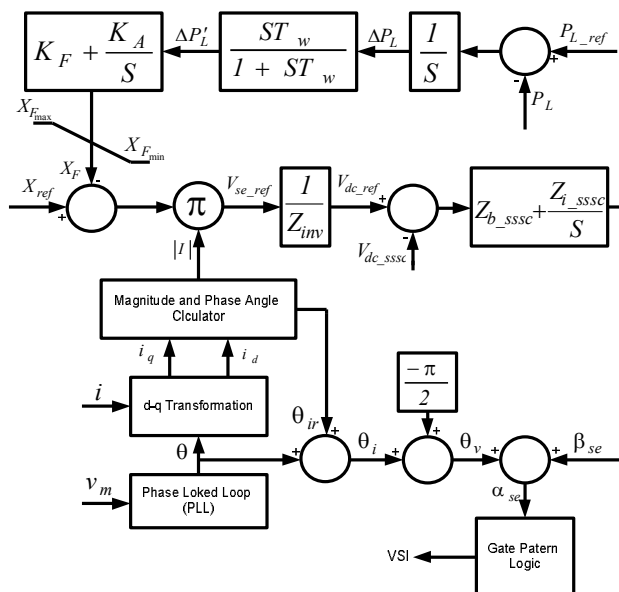
محدودیت‌هایی که در اجرای حل مسئله با استراتژی کنترل پیش‌بین به کار گرفته می‌شوند عبارت‌اند از:

- محدودیت روی دامنه و تغییرات ورودی
- محدودیت روی متغیرهای حالت
- محدودیت روی متغیرهای خروجی

با توجه به قیود ذکر شده، رابطه زیر را برای بیان ریاضی این محدودیت‌ها می‌توان توصیف نمود:

$$\begin{cases} b_{\min} \leq b(r+z) \leq b_{\max}, \Delta b_{\min} \leq \Delta b(r+z) \leq \Delta b_{\max} \\ x_{\min} \leq x(r+z) \leq x_{\max}, \Delta x_{\min} \leq \Delta x(r+z) \leq \Delta x_{\max} \\ k_{\min} \leq k(r+z) \leq k_{\max}, \Delta k_{\min} \leq \Delta k(r+z) \leq \Delta k_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

علاوه بر این به منظور کنترل سیگنال‌های آینده در MPC از یک بردار با طول m_b که دارای عملکرد انتقال روبه‌جلو است استفاده می‌شود. این ماتریس انتقال روبه‌جلو طبق رابطه زیر توصیف می‌شود:



شکل ۷: ساختار کنترلی کننده میرایی مطرح شده برای یک SSSC

معادله ریاضی کنترلی کننده میرایی در SSSC را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_L}{dt} = P_{L_ref} - P_L \\ \frac{\Delta P_L'}{dt} = (P_{L_ref} - P_L) - \frac{\Delta P_L'}{T_w} \\ \frac{dX_F}{dt} = K_F ((P_{L_ref} - P_L) - \frac{\Delta P_L'}{T_w}) + K_A \Delta P_L' \end{cases} \quad (11)$$

۳-۲ کنترل پیش‌بین

در مسائلی که نیاز به پیش‌بینی رفتار آینده سیستم است، استفاده از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را می‌توان به عنوان یک ابزار و روش کنترلی قدرتمند معرفی نمود [۴۰-۴۱]. اطلاعاتی که توسط این روش پیش‌بینی می‌شود به منظور به دست آوردن نقطه بهینه مطابق با معیارهای هر مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که پایه و اساس این روش مدل فرایند است، بنابراین می‌توان از روی ورودی و خروجی‌های پیش‌بینی شده برای تخمین حالات فرایند نیز استفاده کرد. اندازه‌گیری‌های جدید از مدل فرایند که در هر لحظه نمونه‌برداری می‌شود به داخل حلقه کنترلی تزریق می‌شود و بر مبنای این اندازه‌گیری‌های به دست آمده افق پیش‌بین، پیش‌بینی می‌شود. مزیت این استراتژی این است که در هر بازه از زمان نمونه‌برداری شده با توجه به قیدهای حاکم بر سیستم، یک مسئله بهینه‌سازی مقید حل می‌گردد. در واقع محدودیت‌ها و هرگونه تغییر در قیدهای فرایند می‌تواند به صورت یک خطا بر سیستم اعمال شود. یکی از جذابیت‌هایی که کنترل پیش‌بین را از سایر روش‌هایی کنترلی متمایز می‌سازد این است که برای حل مسئله بهینه‌سازی یک دنباله از متغیرهای کنترلی با طول مشخص و یا همان افق پیش‌بین برای رفتار آینده سیستم محاسبه می‌شوند. با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۸، قیود

$$\begin{cases} \Delta \hat{B}^T = [\rho^{-0} \Delta b(r), \dots, \rho^{-(m_b-1)} \Delta b(r+m_b-1)] \\ \hat{X}^T = [\rho^{-1} x(r+1), \dots, \rho^{-m_a} x(r+m_a)] \\ \hat{K}^T = [\rho^{-1} k(r+1), \dots, \rho^{-m_a} k(r+m_a)] \end{cases} \quad (18)$$

در رابطه فوق از سمبل ρ برای نشان دادن تنظیم پارامترها در وزن نمایی استفاده شده است. مقدار این سمبل بزرگ‌تر از یک انتخاب می‌شود. بنابراین معادلات جدید مدل به کاررفته در فضای حالت را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} \hat{x}(r+1) = \hat{F}\hat{x}(r) + \hat{G}\hat{b}(r) \\ \hat{k}(r) = \hat{P}\hat{x}(r) \end{cases} \quad (19)$$

که در آن:

$$\hat{F} = \frac{F}{\rho}, \hat{G} = \frac{G}{\rho}, \hat{P} = \frac{P}{\rho} \quad (20)$$

با جایگزینی رابطه (۲۰) در معادله (۱۹) می‌توان تابع هدف جدید را به صورت زیر بیان نمود:

$$\hat{F}_{jit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z (\hat{k}(r+z) - k_{ref}(r+z))^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z \hat{b}(r+z)^2 \quad (21)$$

برای قیدهای اعمال شده معادله (۱۴) را می‌توان به صورت زیر جایگزین نمود:

$$\begin{cases} \rho^{-Z} b_{\min} \leq \hat{b}(r+z) \leq \rho^{-Z} b_{\max}, \\ \rho^{-Z} \Delta b_{\min} \leq \Delta \hat{b}(r+z) \leq \rho^{-Z} \Delta b_{\max} \\ \rho^{-Z} x_{\min} \leq \hat{x}(r+z) \leq \rho^{-Z} x_{\max}, \\ \rho^{-Z} \Delta a_{\min} \leq \Delta \hat{x}(r+z) \leq \rho^{-Z} \Delta x_{\max} \\ \rho^{-Z} k_{\min} \leq \hat{k}(r+z) \leq \rho^{-Z} k_{\max}, \\ \rho^{-Z} \Delta k_{\min} \leq \Delta \hat{k}(r+z) \leq \rho^{-Z} \Delta k_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

پس از حل معادله (۲۱) مسیر ورودی باید بر حسب متغیرهای استاندارد به صورت رابطه زیر بازنویسی شود:

$$\Delta B^T = [b^0 \Delta \hat{b}(r), \dots, b^{(m_b-1)} \Delta \hat{b}(r+m_b-1)] \quad (23)$$

به طور خلاصه ترتیب حل مسئله برای کنترل کننده پیش‌بین تابعی را می‌توان در مراحل زیر دنبال کرد:

- تعیین مقدار مناسب برای پارامتر ρ
- جایگذاری ماتریس‌های (F, G, P) و متغیرهای (B, X, K) در معادلات (۲۰) و (۲۱).
- اعمال قیود بر اساس مشخصات مسئله مورد نظر توسط معادلات (۲۲) و (۲۳) در تابع هدف.
- اجرای روند بهینه‌سازی برای تابع هدف مبتنی بر توابع لاگر و محاسبه ضرایب این تابع.
- پردازش سیگنال‌های کنترل ورودی انتخاب شده توسط توابع لاگر با استفاده از معادله (۱۷).
- مرتب‌سازی ورودی‌ها بر اساس معادله (۲۳) و اعمال آن به سیستم مورد نظر.

$$\Delta B = [\Delta b(r), \dots, \Delta b(r+z), \dots, \Delta b(r+m_b-1)] \quad (15)$$

۳-۲- مدل‌سازی کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از توابع لاگر

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که بر سر راه پیاده‌سازی عملی کنترل پیش‌بین وجود دارد و اعمال آن را محدود کرده است بار محاسباتی روی خط این کنترل کننده است. در نتیجه در سیستم‌هایی که زمان نمونه برداری آن‌ها بسیار کوچک باشد و یا دینامیک سیستم پیچیده باشد کنترل کننده پیش‌بین در هر گام زمانی با تعداد زیادی متغیر تصمیم‌گیری روبرو خواهد بود و همین باعث کاهش سرعت اجرای بلادرنگ این کنترل کننده است. یکی از رویکردهای بسیار مناسب برای کاهش بار محاسباتی استفاده از کنترل کننده پیش‌بین مدل تابعی است. اساس کار در FMPC به صورتی است که برای انتخاب مسیر مناسب ترکیب خطی از ورودی‌های آینده سیستم به صورت یک و یا تعداد بیش‌تری تابع پایه در نظر گرفته می‌شوند. این توابع ورودی که برای مدل‌سازی مسیر ورودی انتخاب می‌شوند توابع لاگر نامیده می‌شوند [۴۲]. در این توابع با پارامتری کردن دنباله سیگنال کنترل می‌توان به طور مؤثری تعداد قیود موجود در افق پیش‌بینی و در نتیجه تعداد پارامترهایی که در هر گام کنترل کننده با آن سروکار دارد را کاهش داد و بار محاسباتی این کنترل کننده برای سیستم‌های با ابعاد وسیع و یا دینامیک سریع را کم کرد. توابع لاگر یک مجموعه از توابع گسسته با پایه‌ی متعام هستند که تبدیل Z آن‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_g = \frac{\sqrt{1-b^2}}{z-b} \left(\frac{z^{-1}-b}{1-bz^{-1}} \right)^{g-1}, 0 \leq b \leq 1 \quad (16)$$

در این تبدیل b قطب شبکه است و برای این که این شبکه پایدار باشد مقدار b باید بین صفر تا یک باشد.

اکنون می‌توان هر سیگنال کنترل ورودی با استفاده از تابع لاگر را توسط معادله زیر توصیف نمود:

$$\Delta b(r+z) \approx \sum_{g=1}^m a_g \cdot f_g(z) \quad (17)$$

در رابطه بالا f_g ترانهاده شبکه توابع لاگر در معادله (۱۶) بوده و a_g بردار پارامتر نامیده می‌شود. با توجه به رابطه فوق در کاربردهای تئوری برای m معمولاً مقداری کوچک‌تر از ۱۰ در نظر گرفته می‌شود و مقدار انتخاب آن به کاربر بستگی دارد. به عبارت دیگر انتخاب مقادیر بزرگ‌تر برای m تخمین مسیرهای ورودی برای توابع لاگر را افزایش می‌دهد. با توجه به این که افزایش افق پیش‌بینی منجر به بهبود و عملکرد مناسب در رفتار حلقه بسته این کنترل کننده می‌شود لذا در این مقاله جهت کاهش بار محاسباتی از ترکیب توابع لاگر و داده نمایی وزنی به منظور دستیابی به این هدف استفاده شده است. به این منظور معادلات به کاررفته در مدل کلاسیک پیش‌بین را با هدف ترکیب توابع لاگر و ضریب وزنی نمایی می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{bmatrix} E'_{qi_min} \\ E'_{di_min} \\ u_{3_min} \\ u_{5_min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq x \leq \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.2 \\ 0.7 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{di_max} \\ E'_{di_max} \\ u_{3_max} \\ u_{5_max} \end{bmatrix}$$

علاوه بر این، پارامترهای استراتژی کنترل پیش‌بین که در شبیه‌سازی به کار گرفته شده به صورت مقادیر: $m_a=200$ ، $m_b=5$ ، $m=7$ ، $\rho=1/0.8$ و $b=0/24$ تنظیم شده است. همچنین مقدار ضرایب ماتریس‌های وزنی به ترتیب برابر $G=0.14 \times I_{mb \times mb}$ ، $S=1 \times I_{ma \times ma}$ انتخاب شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به شکل ۱، در این بخش جهت اجرای شبیه‌سازی از یک سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت مجهز به یک ژنراتور سنکرون با قدرت ۱۲۳۰ MVA، یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG با توان تولیدی ۸۰ مگاوات مجهز به سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابر خازنی و یک SSSC با قدرت ۵۰ MVA که در خط دوم منتهی به شین بی‌نهایت قرار گرفته، استفاده شده است. مزرعه بادی از طریق یک ترانسفورماتور ۲۳/۱۶۱ KV و یک باس مشترک، با سیستم قدرت ارتباط دارد. در این سیستم مجموع توان تولیدی حاصل شده از مزرعه بادی و ژنراتور سنکرون از طریق یک ترانسفورماتور افزایشنده و دو خط انتقال موازی به یک شبکه قدرت بزرگ یا شین بی‌نهایت انتقال می‌یابد. سایر اطلاعات مربوط به این سیستم در قسمت ضمیمه ارائه شده است.

به منظور اجرای استراتژی مطرح شده برای کنترل پیش‌بین در محیط MATLAB-SIMULINK، با اعمال یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در باس بی‌نهایت، نتایج شبیه‌سازی در حوزه زمان برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این خطا در زمان ۱ ثانیه به سیستم اعمال شده و مدت ۰/۱ ثانیه طول می‌کشد تا این خطا رفع شود. علاوه بر این، به منظور نشان دادن عملکرد کنترل کننده پیشنهادی تحت تغییرات جوی باد، نتایج شبیه‌سازی در قالب سه سناریوی متفاوت در حضور SSSC و SCESS مورد ارزیابی قرار گرفته است.

سناریوی اول: در این سناریو سرعت باد از ۱۱/۵ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه افزایش یافته و سرعت روتور DFIG در حالت فوق سنکرون (۱/۰۹ p.u.) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی برای این سناریو در شکل‌های ۹- الف الی ۹- ب نشان داده شده است. به ترتیب در شکل‌های ۹- الف و ۹- ب پاسخ انحراف سرعت مربوط به ژنراتور سنکرون و توان راکتیو DGIG نشان داده است. در شکل ۹- ج دیده می‌شود که با افزایش سرعت باد از ۱۱/۵ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه توان اکتیو DFIG از ۰/۷ p.u. تا ۰/۷۵ p.u. افزایش یافته و پس از چند نوسان کوچک در محدوده مناسبی میرا می‌شود. در شکل ۹- د دیده می‌شود که با افزایش سرعت باد، سرعت روتور DFIG افزایش یافته و در سرعت ۱۲ متر بر ثانیه از باد به مقدار ۱/۰۹ پریونیت رسیده است.

۳-۳- تطبیق استراتژی مطرح شده برای سیستم تحت مطالعه

در این قسمت جهت اجرای استراتژی پیش‌بین به روی سیستم تحت مطالعه، نیاز است که روابط مطرح شده در این استراتژی با مدل سیستم قدرت تطبیق پیدا کند. بنابراین مشخص کردن معادلات شبکه شامل ژنراتورهای سنکرون، مزرعه بادی، SSSC و SCESS در فضای حالت برای اجرای این استراتژی ضروری است. طبق رابطه زیر خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + ER \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (24)$$

در رابطه بالا X بردار حالت سیستم بوده و برای سیستم مورد مطالعه در این مقاله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} X = [X_{SG}, X_{RSC}, X_{GSC}, X_{SCESS}, X_{SSSC}]^T \\ X_{SG} = [E'_{qi}, E'_{di}, \delta_i, \omega_i], X_{RSC} = [u_1, u_2, u_3, u_4] \\ X_{GSC} = [u_5, u_6, u_7], X_{SCESS} = [\Delta P_{gw}, \Delta P'_{gw}, V_{CS}, \Delta \gamma_s] \\ X_{SSSC} = [\Delta P_L, \Delta P'_L, X_F] \end{cases}$$

که در آن بردار $U = [Q_{sw_ref}, \omega_{rw_ref}, P_{gw_ref}, PL_{ref}]^T$ به عنوان بردار ورودی کنترل پیش‌بین، متغیر D برابر با صفر، و همچنین متغیر R بردار اختلال است که در این مقاله برابر با صفر است.

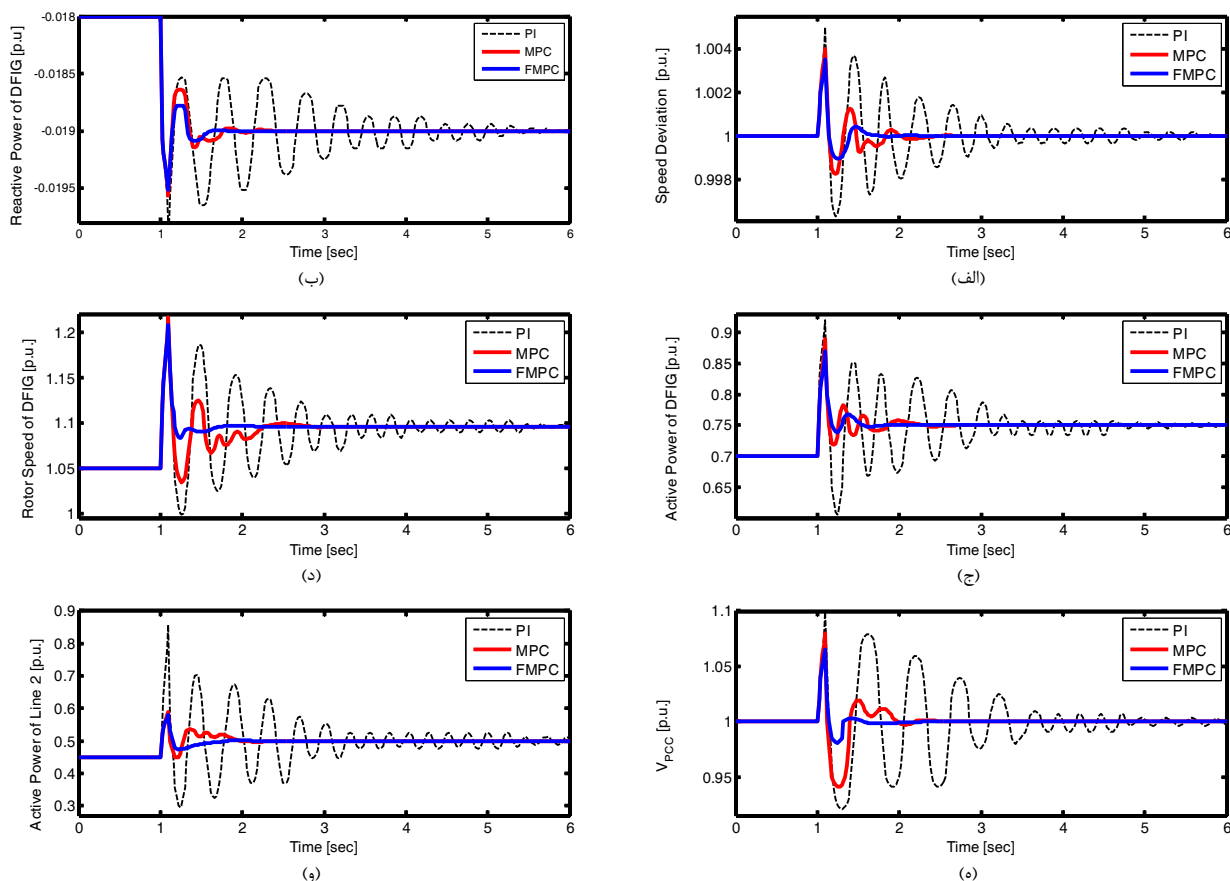
به منظور اصلاح پاسخ بهینه به دست آمده از کنترل پیش‌بین قیود انتخابی باید در محدوده مجاز تعریف شده باشند. بنابراین در این مقاله قیود مورد نظر جهت رسیدن به اهداف مورد نظر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو با رویکرد انتخاب بردارهای مرجع مناسب برای مبدل سمت روتور با محدودیت $(V_{drw_min} \leq V_{drw} \leq V_{drw_max}, V_{qrw_min} \leq V_{qrw} \leq V_{qrw_max})$
- کنترل توان اکتیو مبدل سمت شبکه با رویکرد انتخاب خروجی مناسب برای کنترل کننده میرایی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی با محدودیت $(V_{\gamma s_min} \leq V_{\gamma s} \leq V_{\gamma s_max})$
- کنترل توان جاری شده در خط با رویکرد انتخاب خروجی مناسب برای کنترل میرایی در SSSC با محدودیت $(X_F \leq X_{F_max})$

در حالت کلی مقدار مینیمم و ماکزیمم برای تعاریف فوق جهت اعمال قیود به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} v_{drw_min} \\ v_{qrw_min} \\ V_{\gamma s_min} \\ X_{F_min} \end{bmatrix} = 0 \leq u \leq 1 = \begin{bmatrix} v_{drw_max} \\ v_{qrw_max} \\ V_{\gamma s_max} \\ X_{F_max} \end{bmatrix}$$

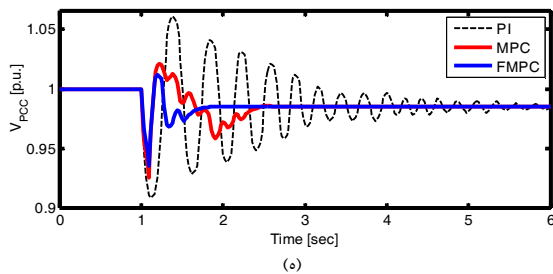
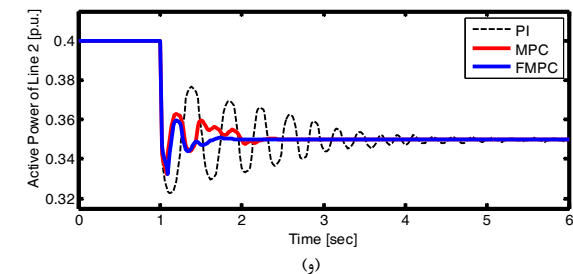
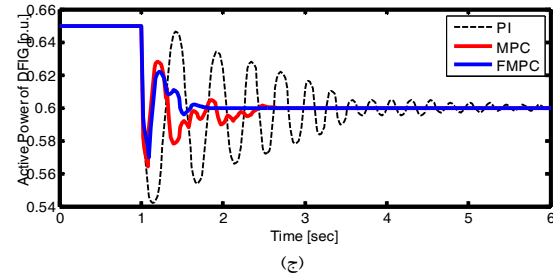
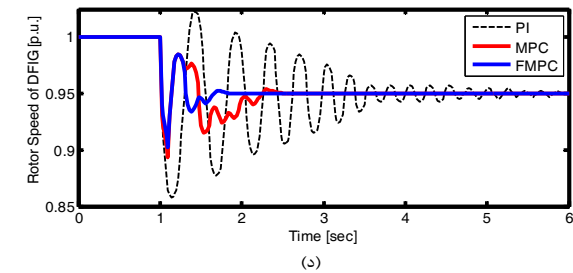
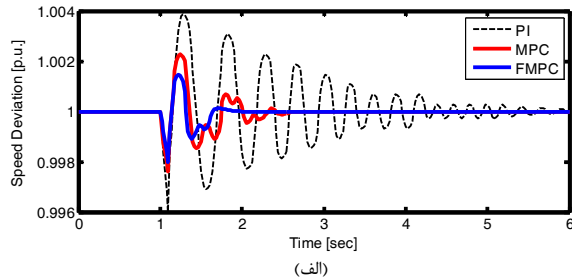
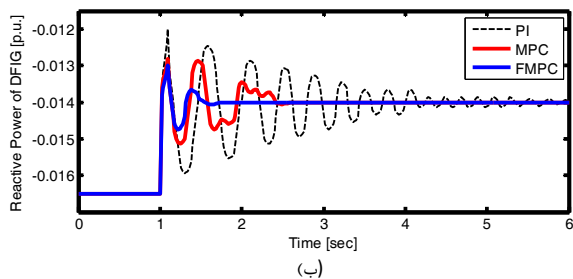
با توجه به اینکه قیود اعمالی برای سیگنال‌های کنترلی باعث کندی در زمان اجرای شبیه‌سازی می‌شوند ولی محدودیت اعمال شده برای بردارهای حالت چنین مشکلی را ندارد لذا در این مقاله قیود اعمالی برای بردارهای حالت در محدوده مینیمم و ماکزیمم مقدار مجاز برابر است با:



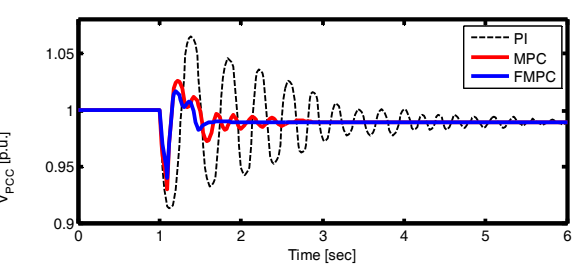
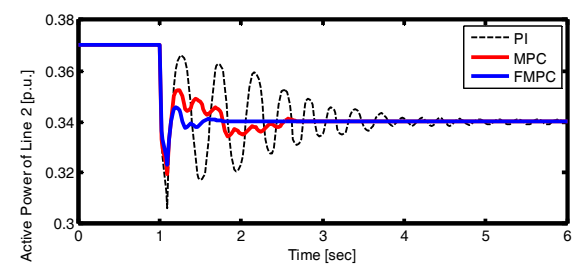
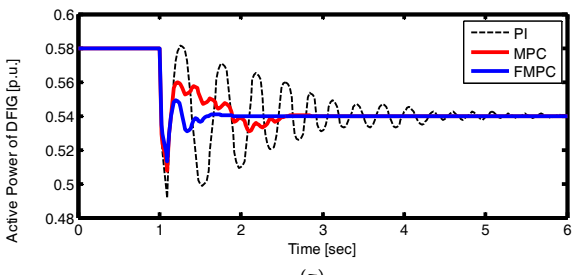
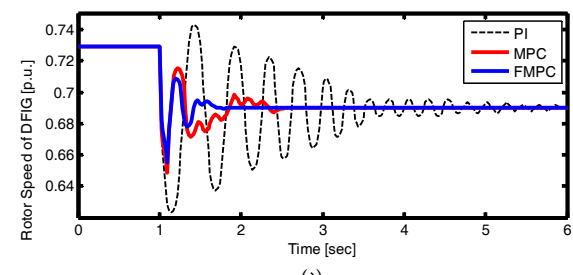
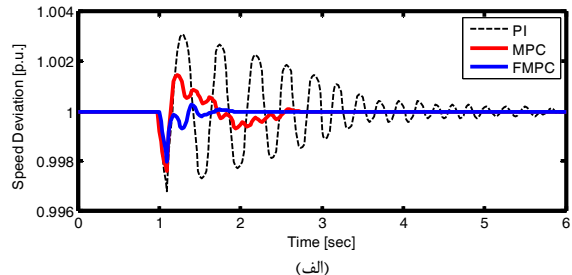
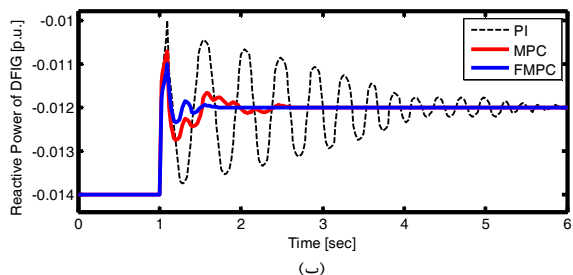
شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی پاسخ گذرا برای سناریوی اول

پاسخ ولتاژ باس مشترک (V_{PCC}) در شکل ۹-ه و توان اکتیو جاری شده در خط دوم در شکل ۱۰-و نشان داده است. در این سناریو نیز همانند سناریوی اول به‌وضوح دیده می‌شود که کنترل-کننده FMPC نسبت به MPC و PI، عملکرد مطلوب‌تری در جهت بهبود میرایی و کاهش فرافروش، فروجهش و زمان نشست دارد. سناریوی سوم: در این سناریو سرعت باد از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۸/۵ متر بر ثانیه کاهش یافته و سرعت روتور DFIG با توجه به تغییرات باد در سرعت زیر سنکرون (۰/۷۲۹ p.u.) مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. نتیجه این تغییرات در سرعت باد برای انحراف سرعت ژنراتور سنکرون و توان راکتیو DFIG به ترتیب در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان داده شده است. در شکل ۱۱-ج نیز دیده می‌شود که توان اکتیو DFIG از ۰/۵۸ تا ۰/۵۴ کاهش یافته است. همچنین در شکل ۱۱-د کاهش سرعت روتور توربین با کاهش سرعت باد نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۱-ه و ۱۱-و نیز به ترتیب پاسخ ولتاژ باس مشترک V_{PCC} و توان اکتیو جاری شده در خط دوم نشان داده شده است. در تمامی شکل‌های فوق به‌وضوح دیده می‌شود که در FMPC مدت‌زمان حضور نوسانات و دامنه آن‌ها نسبت به MPC و PI کم‌تر بوده و توانسته است پایداری سیستم را در حد مطلوبی حفظ کند.

پاسخ ولتاژ باس مشترک (V_{PCC}) در شکل ۹-ه و توان اکتیو جاری شده در خط دوم سیستم قدرت در شکل ۹-و نشان داده شده است. از تمامی نتایج در این سناریو مشخص است که کنترل‌کننده-های پیش‌بین عملکرد مطلوب‌تری نسبت به کنترل‌کننده PI دارند. سناریوی دوم: در این سناریو سرعت باد از ۱۱ متر بر ثانیه تا ۱۰/۵ متر بر ثانیه کاهش یافته و سرعت روتور DFIG با توجه به تغییرات باد در سرعت سنکرون (۱ p.u.) مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در شکل ۱۰-الف تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون و در شکل ۱۰-ب تغییرات توان راکتیو ژنراتور القایی نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۰-ب دیده می‌شود با کاهش سرعت باد دامنه توان راکتیو از ۰/۱۷ تا ۰/۱۳۵ تغییر یافته است. از این نتیجه می‌شود که هر سه کنترل‌کننده مطرح‌شده عملکرد خوبی را تحت تغییرات سرعت باد از خود نشان می‌دهند، و تنها تفاوت در بین آن‌ها بهبود میرایی نوسانات است که در این میان کنترل‌کننده FMPC به‌وضوح عملکرد مطلوب خود را نسبت به MPC و PI نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰-ج با کاهش سرعت باد مقدار توان اکتیو از ۰/۶۵ تا ۰/۶ کاهش یافته است. این در حالی است که سرعت روتور DFIG در شکل ۱۰-د از مقدار ۱ پریونیت در حالت سنکرون به مقدار ۰/۹۵ پریونیت کاهش یافته است. علاوه‌بر این



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی پاسخ گذرا برای سناریوی دوم



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی پاسخ گذرا برای سناریوی سوم

سناریوی سوم، نتایج نسبت میرایی مربوط به PI، MPC و FMPC به ترتیب برابر با ۰/۲۴۰، ۰/۵۴۹ و ۰/۷۱۶ به دست آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش FMPC به‌عنوان یک روش تحلیلی در بهبود پایداری سیستم‌های قدرت مطرح شد و با دو روش کنترل پیش‌بین مدل و کنترل‌کننده PI مقایسه شد. در MPC جهت کاهش بار محاسباتی در انتخاب مسیرهای ورودی از تابع لاگر و همچنین به‌منظور کاهش زمان نمونه‌برداری در افق پیش‌بین از داده‌نمایی وزنی استفاده شد. این روش پیشنهادی تحت عنوان FMPC در سیستم قدرت تک‌ماشینه مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از به‌کارگیری SCESS کنترل توان اکتیو مبدل سمت شبکه در توربین‌های بادی و هدف از SSSC کاهش نوسانات فرکانس پایین با استفاده از طراحی یک کنترل‌کننده میرایی برای هرکدام از این جبران‌سازها بود. علاوه بر طراحی کنترل‌کننده‌های میرایی با استفاده از استراتژی پیش‌بین در دو حالت FMPC و MPC، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در مبدل سمت روتور به‌منظور به دست آوردن سیگنال‌های کنترلی مناسب (V_{qr}, V_{dr}) جهت بهبود هر چه بیشتر پایداری سیستم انجام شد. شبیه‌سازی انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای سیستم تحت مطالعه با اعمال یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز تحت شرایط بهره‌برداری متفاوت ارزیابی شد. از نتایج به‌دست‌آمده توسط این شبیه‌سازی مشخص شد که استراتژی‌های پیش‌بین، قدرت فوق‌العاده‌ای در بهبود میرایی و کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو دارند.

در همه سناریوهای مطرح‌شده، زمان نشست متوسط در FMPC برابر با ۱/۵۷ در MPC برابر با ۲/۷۱ و در PI برابر با ۵/۶۸ ثانیه به دست آمده است. علاوه بر این، طول مدت‌زمان شبیه‌سازی در FMPC برابر با ۵۸۴/۱۵۴ در MPC برابر با ۶۹۳/۳۴۶ و در PI برابر با ۵۶۹/۰۱۸ ثانیه بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت FMPC نسبت به MPC از لحاظ سرعت، عملکرد و همچنین زمان اجرای شبیه‌سازی، پاسخ بهتری را فراهم می‌آورد، اما نسبت به PI کمی تأخیر زمانی دارد که در مقایسه با نتایج بسیار مطلوب FMPC می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

۵- تحلیل مقادیر ویژه

در این بخش نتایج مربوط به مقادیر ویژه برای سیستم تحت مطالعه در شرایط بهره‌برداری متفاوت طبق جدول ۱ فراهم شده است. همان‌طوری که از نتایج جدول ۱ مشخص است در هر سه سناریو نسبت‌های میرایی به‌دست‌آمده از هر دو روش FMPC و MPC نسبت به PI به مراتب بهتر بوده است. علاوه‌براین، قسمت‌های موهومی در دو روش FMPC و MPC تقریباً یکسان بوده ولی قسمت‌های حقیقی مربوط به روش FMPC افزایشی بوده است. این بدان معنی است که نسبت میرایی قطب‌ها در این روش افزایشی بوده و در نتیجه از پایداری بیش‌تری برخوردار است. به‌طور مثال با توجه به توضیحات ارائه‌شده در سناریوی اول، دیده می‌شود که نسبت میرایی برای کنترل‌کننده PI برابر با ۰/۲۷۵ است. این در حالی است که نسبت میرایی برای MPC و FMPC به ترتیب برابر با ۰/۶۳۳ و ۰/۸۱۶ به دست آمده است. در سناریوی دوم نیز نسبت میرایی برای کنترل‌کننده PI برابر ۰/۲۲۷، برای MPC برابر ۰/۶۸۶ و برای FMPC برابر با ۰/۸۳۲ به دست آمده است. به‌طور مشابه در

جدول ۱: مقادیر ویژه برای سیستم مورد مطالعه تحت سناریوهای متفاوت

سناریو ها	PI		MPC		FMPC	
	مقدار ویژه	نسبت میرایی	مقدار ویژه	نسبت میرایی	مقدار ویژه	نسبت میرایی
سناریوی اول $V_w=12 \text{ m/s}$ $\omega_r=1/0.9 \text{ p.u.}$	$-0.076 \pm 2/98i$	۰/۲۴۷	$-1/78 \pm 1/81i$	۰/۷۰۱	$-2/0.1 \pm 1/81i$	۰/۷۴۳
	$-0.078 \pm 2/11i$	۰/۲۴۳	$-1/32 \pm 1/94i$	۰/۵۶۲	$-2/0.7 \pm 1/93i$	۰/۷۳۱
	$-0.069 \pm 2/86i$	۰/۲۳۴	$-1/76 \pm 1/98i$	۰/۶۶۴	$-2/51 \pm 1/99i$	۰/۷۸۳
	$-0.084 \pm 2/93i$	۰/۲۷۵	$-1/67 \pm 2/0.4i$	۰/۶۶۳	$-2/91 \pm 2/0.6i$	۰/۸۱۶
	$-0.058 \pm 2/95i$	۰/۱۹۳	$-1/83 \pm 2/41i$	۰/۶۰۷	$-2/0.4 \pm 2/39i$	۰/۶۴۹
سناریوی دوم $V_w=11 \text{ m/s}$ $\omega_r=1 \text{ p.u.}$	$-0.088 \pm 2/98i$	۰/۲۸۳	$-1/89 \pm 2/64i$	۰/۵۸۲	$-2/72 \pm 2/62i$	۰/۷۲۰
	$-0.074 \pm 2/0.6i$	۰/۲۳۵	$-1/93 \pm 2/22i$	۰/۶۵۶	$-2/0.5 \pm 2/22i$	۰/۶۷۸
	$-0.068 \pm 2/92i$	۰/۲۲۷	$-1/85 \pm 1/96i$	۰/۶۸۶	$-2/97 \pm 1/98i$	۰/۸۳۲
	$-0.070 \pm 2/0.7i$	۰/۲۲۲	$-1/67 \pm 2/53i$	۰/۵۵۰	$-2/53 \pm 2/55i$	۰/۷۰۴
	$-0.081 \pm 2/36i$	۰/۲۳۴	$-1/65 \pm 1/92i$	۰/۶۵۱	$-1/98 \pm 1/94i$	۰/۷۱۴
سناریوی سوم $V_w=8 \text{ m/s}$ $\omega_r=0.729 \text{ p.u.}$	$-0.079 \pm 3/16i$	۰/۲۴۲	$-1/84 \pm 2/0.6i$	۰/۶۶۷	$-2/79 \pm 2/0.6i$	۰/۸۰۴
	$-0.083 \pm 2/22i$	۰/۲۴۷	$-1/79 \pm 2/18i$	۰/۶۳۴	$-2/11 \pm 2/19i$	۰/۶۹۴
	$-0.077 \pm 3/15i$	۰/۲۳۷	$-1/67 \pm 2/69i$	۰/۵۲۷	$-1/92 \pm 2/66i$	۰/۵۸۵
	$-0.084 \pm 2/39i$	۰/۲۴۰	$-1/54 \pm 2/34i$	۰/۵۴۹	$-2/39 \pm 2/33i$	۰/۷۱۶
	$-0.078 \pm 2/0.7i$	۰/۲۴۶	$-1/32 \pm 2/76i$	۰/۴۳۱	$-2/24 \pm 2/76i$	۰/۶۳۳

$$D_{\omega t}(\Phi_S, \beta_{\omega t}) = d_1 \left(\frac{d_2}{\Phi_S} - d_3 \beta_{\omega t} - d_4 \cdot \beta_{\omega t}^{d_5} - d_6 \right) \exp\left(\frac{-d_7}{\Phi_S}\right) \quad (26)$$

که در آن:

$$\Phi^{-1} = \left[\lambda_{\omega t} + d_8 \beta_{\omega t} \right]^{-1} - \left[d_9 (\beta_{\omega t}^3 + 1)^{-1} \right] \quad (27)$$

$$\lambda_{\omega t} = (R_b \cdot \omega_b) \left(V_{\omega t}^3 \right)^{-1} \quad (28)$$

پارامترهای مورد استفاده در این مقاله و اطلاعات مربوط به سیستم تحت مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

ضمیمه

در حالت کلی توان مکانیکی یک توربین بادی سرعت متغیر که به آنرودینامیک آن بستگی دارد به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۴۳]:

$$P_{\omega t} = \frac{1}{2} \rho_{\omega t} \cdot K_{\omega t} \cdot V_{\omega t}^3 \cdot D_{\omega t}(\lambda_{\omega t}, \beta_{\omega t}) \quad (25)$$

در رابطه فوق، $D_{\omega t}$ ضریب راندمان است که برای یک توربین بادی سرعت متغیر به صورت زیر بیان می‌شود:

جدول ۲: فهرست پارامترهای ریاضی استفاده شده در مقاله

$P_{\omega t}$	توان گرفته شده از توربین بادی بر حسب وات	P_{dc}	توان اکتیو خازن لینک DC
$\rho_{\omega t}$	چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب	$P_{r\omega}$	توان اکتیو مبدل سمت روتور
$K_{\omega t}$	سطح جاروب شده از پره‌ها بر حسب مترمربع	$P_{g\omega}$	توان اکتیو مبدل سمت شبکه
$V_{\omega t}$	سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه	C_{dc}	ظرفیت خازن لینک DC
$D_{\omega t}$	ضریب عملکرد پره	V_{dc}	ولتاژ خازن لینک DC
$\beta_{\omega t}$	زاویه پیچش پره	$Z_{q1} \& Z_{i1}$	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم توان راکتیو
$\lambda_{\omega t}$	نسبت سرعت نوک پره	$Z_{q2} \& Z_{i2}$	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم جریان RSC
$d_1 - d_9$	ضرایب ثابت	$Z_{q3} \& Z_{i3}$	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم سرعت RSC
R_b	شعاع پره بر حسب متر	i_{dr_ref}	کنترل جریان مرجع در محور d برای RSC
ω_b	سرعت زاویه‌ای پره بر حسب رادیان بر ثانیه	i_{qr_ref}	کنترل جریان مرجع در محور q برای RSC
L_{ss}	اندوکتانس خودی استاتور	Q_{sv_ref}	توان راکتیو مرجع
L_{rr}	اندوکتانس خودی روتور	ω_{r_ref}	سرعت مرجع
L_{mm}	اندوکتانس متقابل	$Z_{bg} \& Z_{ig}$	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم ولتاژ خازن لینک DC
R_s	مقاومت استاتور	$Z_{pb} \& Z_{pi}$	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم جریان GSC
R_r	مقاومت روتور	$i_{qg\omega_ref}$	کنترل جریان مرجع در محور q برای GSC
i_{ds}	جریان استاتور در محور d	V_{dc_ref}	ولتاژ مرجع از خازن لینک DC
i_{qs}	جریان استاتور در محور q	$Z_{b\beta} \& Z_{i\beta}$	ضرایب کنترل کننده PI
i_{dr}	جریان روتور در محور d	$\tau_{b\beta}$	ثابت زمانی تأخیری برای کنترل کننده زاویه پیچ پره
v_{ds}	جریان روتور در محور q	$P_{g\omega}$	توان اندازه‌گیری شده توربین بادی برای کنترل پره
v_{dr}	ولتاژ ترمینال استاتور در محور d	$P_{g\omega_ref}$	توان مرجع توربین بادی برای کنترل پره
v_{qs}	ولتاژ ترمینال استاتور در محور q	$x(z)$	بردار حالت برای MPC
v_{dr}	ولتاژ ترمینال روتور در محور d	$b(z)$	بردار ورودی برای MPC
v_{qr}	ولتاژ ترمینال روتور در محور q	$c(z)$	بردار اغتشاشات برای MPC
H_t	ضریب ثابت اینرسی توربین بادی	$k(z)$	بردار خروجی برای MPC
H_g	ضریب ثابت اینرسی ژنراتور	Z	زمان نمونه برداری MPC
ω_t	سرعت زاویه‌ای توربین بادی	G_z	ماتریس وزنی تابع هزینه
ω_r	سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور	S_z	ماتریس وزنی تلاش کنترلی در تابع هزینه
$T_{\omega t}$	گشتاور مکانیکی توربین بادی	$k'(r+z)$	بردار پیش‌بینی سیگنال خروجی
T_{ig}	گشتاور شفت	$k_{ref}(r+z)$	مسیر مرجع آینده سیستم
$T_{\omega t}$	گشتاور الکتریکی توربین بادی	$\Delta b(r+z)$	بردار تلاش کنترلی
K_t	ضریب میرایی توربین	m_c	نسبت تبدیل برای ترانسفورماتور کوپلینگ SSSC
K_g	ضریب میرایی ژنراتور	Z_{inv}	شاخص مدولاسیون SSSC
K_{ig}	ضریب میرایی کوپل شده بین شفت و جرم	V_{dc_sssc}	ولتاژ خازن لینک dc برای SSSC
L_{ig}	انعطاف‌پذیری شفت	β_s	زاویه فاز ولتاژ تزریقی برای SSSC

جدول ۳: پارامترهای مربوط به سیستم تحت مطالعه

پارامترهای مربوط به ژنراتور سنکرون											
Generator	Rated MVA	Rated KV	Power Factor	X_d (pu)	X'_d (pu)	X_q (pu)	X'_q (pu)	τ'_{do}	τ'_{qo}	H (s)	ω_s (pu)
----	۱۲۳۰	۱۵	۰/۹۷۵ lagging	۰/۸۹۷۹	۰/۲۹۲۵	۰/۶۴۶	۰/۶۴۶	۷/۴	۰/۵	۶/۴	۱
Exciter	K_A	T_A (s)	K_E	T_E (s)	K_F	T_F (s)	A_X	B_X	---	---	---
----	۲۰۰	۰/۰۱	۱	۰/۳۱۴	۰/۰۶۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳۹	۱/۵۵	---	---	---
پارامترهای مربوط به ژنراتور القایی دوستغذیه و توربین بادی											
$P=5$ MW	$V=0/69$ KV	$R_s=0/042$ pu	$R_r=0/005$ pu	$C_{dc}=0/01$ F	$L_{mm}=2/9$ pu	$L_{rr}=3/056$ pu	$L_{ss}=3/071$ pu				
$X_{ig}=0/55$ p.u.	$K_f=0/5$ pu	$K_{ig}=2/5$ pu	$L_{ig}=0/93$ pu	$H_f=0/05$ pu	$H_g=10/2$ pu	$Z_{q1}=15$	$Z_{l1}=9/2$				
$Z_{q2}=8/6$	$Z_{l2}=3/87$	$Z_{q3}=15$	$Z_{l3}=9/2$	$Z_{bg}=17/35$	$Z_{ig}=10/43$	$Z_{pb}=12$	$Z_{lb}=8/53$				
$\beta_{wt_min}=0$	$\beta_{wt_max}=30$ (deg)	$Z_{bf}=1/11$	$d_1=0/22$	$d_2=116$	$d_3=0/954$	$d_4=0/18$	$d_5=0/955$				
$d_6=6/161$	$d_7=11/89$	$d_8=12/95$	$d_9=0/88$	$R_b=1/16$ m	---	---	---				
SSSC با قدرت (±۵۰ MVAR)											
$S=50$ MVA	$V=161$ KV	$F=60$ HZ	$R=0/01$	$L=0/02$	$V_{dc}=40$ KV	$C_{dc}=175$ μF	$Z_{b_sssc}=0/015$	$Z_{l_sssc}=0/15$			
$K_f=0/68$	$K_A=0/31$	$T_W=10$	$Z_{mv}=1/68$	---	---	---	---	---			
خطوط انتقال											
$R_{TL1}=R_{TL2}=0/0005$ p.u.						$X_{TL1}=X_{TL2}=0/012$ p.u.					
SCESS											
$C=20$ mF	$C_{ees}=20$ F	$L_{ees}=50$ mH	$V_{sc}=2$ KV	$V_{dc}=4$ KV	$K_C=0/86$	$K_D=0/24$	$K_F=2/65$	$T_F=0/44$	$T_W=10$		

مراجع

[10] M. Zamanifar, B. Fani, M. E. H. Golshan and H. R. Karshenas, "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II," *Electric Power System Research*, vol. 108, no. 3, 2014.

[11] A. Ehsanolah and M. Biglari, "A novel approach to capture the maximum power from variable speed wind turbines using PI controller, RBF neural network and GSA evolutionary algorithm," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, no.1, 2015.

[12] S. Ravichandran, R. P. Kumudinidevi, S. G. Bharathidasan and V. Evangelin Jeba, "Coordinated controller design of grid connected DFIG based wind turbine using response surface methodology and NSGA II," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, no. 4, 2014.

[13] F. E. V. Taveiros, L. S. Barros and F. B. Costa, "Back-to-back converter state-feedback control of DFIG (doubly-fed induction generator)-based wind turbines," *Energy*, vol. 89, no. 6, 2015.

[14] T. Surinkaew and I. Ngamroo, "Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on specified structure mixed H2/H∞ control," *Renewable Energy*, vol. 66, no. 6, 2014.

[15] M. El Mokadem, V. Courtecuisse, C. Saudemont, B. Robyns and J. Deuse, "Fuzzy logic supervisor-based primary frequency control experiments of a variable speed wind generator," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 24, no. 1, 2009.

[16] H. M. Jabr, D. Lu and N. C. Kar, "Design and implementation of neuro-fuzzy vector control for wind-driven doubly-fed induction generator," *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, vol. 2 no. 4, 2011.

[17] S. I. Gkavanoudis and C. S. Demoulias, "A combined fault ride-through and power smoothing control method for full-converter wind turbines employing Supercapacitor Energy Storage System," *Electric Power Systems Research*, vol. 106, no. 7, 2014.

[18] R. Llorente Iglesias, R. Lacal Arantegui and M. Aguado Alonso, "Power electronics evolution in wind turbines a market-based analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, 2011.

[1] N. L. Panwar, S. C. Kaushik and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, 2011.

[2] A. Mostafaeipour, "Productivity and development issues of global wind turbine industry," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, 2010.

[3] G. O. Suvire and P. E. Mercado, "Active power control of a flywheel energy storage system for wind energy applications," *IET Renewable Power Generation*, vol. 6, no. 1, 2012.

[4] M. J. Hossain, H. R. Pota, V. A. Ugrinovskii and R. A. Ramos, "Simultaneous STATCOM and pitch angle control for improved LVRT capability of fixed-speed wind turbines," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, 2010.

[5] C. Dongkyoung and K. B. Lee, "Variable structure control of the active and reactive powers for a DFIG in wind turbines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, 2010.

[6] M. Darabian, A. Jalilvand and R. Noroozian, "Combined use of sensitivity analysis and hybrid wavelet-PSO- ANFIS to improve dynamic performance of DFIG-based wind generation," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering (JOAPE)*, vol. 2, no. 1, 2014.

[7] M. Bhinal, B. Praghness and P.Vivek, "Small signal stability enhancement of DFIG based wind power system using optimized controllers parameters," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, no.7, 2015.

[8] X. I. Xinze, G. Hua and G. Yang, "Enhanced model of the doubly fed induction generator-based wind farm for small-signal stability studies of weak power system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 7, 2014.

[9] Y. Lihui, Xu. Zhao, J.Østergaard, D. Zhao Yang, W. Kit and Ma. Xikui, "Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, 2011.

- generator direct power control," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, 2012.
- [33] J. Han, S. K. Solanki, and J. Solanki, "Coordinated predictive control of a wind/battery microgrid system," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 4 2013.
- [34] Z. Wang, J. Wang, B. Chen, M. M. Begovic and Y. He, "MPC-based voltage/var optimization for distribution circuits with distributed generators and exponential load models," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, 2014.
- [35] J. Yang and W. X. Zheng, "Offset-free nonlinear MPC for mismatched disturbance attenuation with application to a static var compensator," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, vol. 61, no. 1, 2014.
- [۳۶] فاطمه پیروزمند، نعمت‌الله قهرمانی و محمدرضا عاروان، «طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی برای سیستم کنترل وضعیت ماهواره»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۴، زمستان ۹۳.
- [37] H. Mincho, "Predictive functional controls using a blending approach," *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 5, no. 2, 2005.
- [38] H. Liu and S. Li, "Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, 2012.
- [39] P. M. Anderson and A. A. Fouad: *Power System Control and Stability*, Ames, IA, USA: The Iowa State Univ. Publishing, 1977.
- [40] Y. Zong, D. Kullmann, A.Thavlov, O. Gehrke and H.W. Bindner, "Application of model predictive control for active load management in a distributed power system with high wind penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 7, 2012.
- [41] A. Martin, M. Cannon and B. Kouvaritakis, "Robust MPC tower damping for variable speed wind turbines," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 8, 2015.
- [42] G. Valencia-Palomo and J. A. Rossiter, "Novel programmable logic controller implementation of a predictive controller based on Laguerre functions and multiparametric solutions," *IET Control Theory Appl*, vol. 6, no. 8, 2012.
- [43] H. Hasanien and M. Mueeen, "Design optimization of controller parameters used in variable speed wind energy conversion system by genetic algorithms," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no.2, 2012.
- [19] F. Islam, A. Al-Durra and S. M. Mueeen, "Smoothing of wind farm output by prediction and supervisory-control-unit-based FESS," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, 2013.
- [20] X. Sui, Y. Tang, H. He and J. Wen, "Energy-storage-based low-frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 29, no. 5, 2014.
- [21] Y.Wan and J. Zhao, "Extended backstepping method for single-machine infinite-bus power systems with SMES," *IEEE Transactions on Control Systems*, vol. 21, no. 3, 2013.
- [22] Z. Wang, B.Yuwen, Y. Lang and M. Cheng, "Improvement of operating performance for the wind farm with a novel CSC-type wind turbine-SMES hybrid system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, 2013.
- [23] D. N. Truong and V. T. Ngo, "Designed damping controller for SSSC to improve stability of a hybrid offshore wind farms considering time delay," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, no. 7, 2015.
- [24] J. D. Nguimfack-Ndongmo, G. Kenné and R. Kuate-Fochie, A. Cheukem, H.B Fotsin and F. Lamnabhi-Lagarrigue, "A simplified nonlinear controller for transient stability enhancement of multimachine power systems using SSSC device," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, no. 5, 2014.
- [25] B. Lei and S. Fei, "A brand new nonlinear robust control design of SSSC for transient stability and damping improvement of multi-machine power systems via pseudo-generalized Hamiltonian theory," *Control Engineering Practice*, vol. 29, no. 4, 2014.
- [26] R. K. Khadanga and J. K. Satapathy, "Time delay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO-GSA algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 71, no. 6, 2015.
- [۲۷] سعید ابادری و امید مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به‌کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۶۴، شماره ۱، بهار ۹۵.
- [28] E. Camponogara and H. F. Scherer, "Distributed optimization for model predictive control of linear dynamic networks with control-input and output constraints," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, 2011.
- [29] E. Bijami J. Askari and M. M. Farsangi, "Design of stabilising signals for power system damping using generalised predictive control optimised by a new hybrid shuffled frog leaping algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 10, 2012.
- [30] M. Darabian and A. Jalilvand, "Power system stability enhancement in the presence of renewable energy resources and HVDC lines based on predictive control strategy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 80, no. 7, 2016.
- [31] J. Alfeu, S. Filho, E. Milton, O. Filho and E. R Filho, "A predictive power control for wind energy," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, 2011.
- [32] J. Alfeu, S. Filho and E. R. Filho, "Model-based predictive control applied to the doubly-fed induction

زیرنویس‌ها

- 1 Energy Storage sysytem
- 2 Doubly-Fed Induction Generator
- 3 Grid Side Converte
- 4 Rotor Side Converte
- 5 Super Capacitor Energy Storage System
- 6 Flywheel Energy-Storage System
- 7 Superconducting Magnetic Energy Storage
- 8 Low Frequency Oscillation
- 9 Power System Stabilizer
- 10 Static Synchronous Series Compensator
- 11 Model Predictive Control

-
- 12 High Voltage Direct Current
 - 13 Static Var Compensator
 - 14 Functional Model Predictive Control