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 جلیلوند^۲، دانشیار ۱- گروه مهندسی برق – دانشکده مهندسی– دانشگاه زنجان – زنجان – ایران – ajalilvand@znu.ac.ir ۲- گروه مهندسی برق – دانشکده مهندسی– دانشگاه زنجان – زنجان – ایران – ajalilvand

چکیده: هدف اصلی این مقاله به کارگیری 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 ذخیره ساز انرژی ابرخازنی (SCESS) جهت کنترل توان اکتیو در مبدل سمت شبکه و حفظ تعادل ولتاژ لینک dc و از جبران ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) بهمنظور کنترل پخش توان و کاهش نوسانات فرکانس پایین در خط منتهی به شین بینهایت استفاده شده است. استراتژی مطرح شده مبتنی بر کنترل پیشبین تابعی بوده که می تواند به صورت همزمان علاوه بر کنترل توان های اکتیو و راکتیو مبدل سمت روتور، در طراحی کنترل کننده میرایی برای SCESS و SSSC به کا گرفته شود. در کنترل پیشبین تابعی بهمنظور کاهش بار محاسباتی در انتخاب مسیرهای ورودی از توابع لاگر و همچنین از داده نمایی وزنی جهت کاهش زمان نمونهبرداری در افق پیشبینی استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برای این کنترل کننده با دو روش دیگر شامل کنترل پیشبین مدل و کنترل کننده او موزی در افق پیش مینی استفاده شده است. نتایج شبیه ازی برای این کنترل کننده با دو روش دیگر شامل کنترل پیش بین می وزنی جهت

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 Convertor (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 Convertor (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 و تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۱/۲۳ و ۱۳۹۵/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱ نام نویسنده مسئول: ایران – زنجان – کیلومتر ۶ جاده تبریز – دانشگاه زنجان – دانشکده مهندسی – گروه مهندسی برق

۱ – مقدمه

امروزه از انرژی باد بهعنوان یکی از محبوب ترین منابع انرژی های تجدیدپذیر جهت تولید انرژی الکتریکی در سرتاسر دنیا استفاده می-شود. 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 شبکه های الکتریکی می شود. بنابراین وجود چنین نوساناتی از دید پایداری و کیفت توان در یک سیستم قدرت غیرقابل اغماض است [۲-۱]. این امر در تمامی انواع توربین های بادی سرعت ثابت و سرعت متغیر می تواند مورد توجه باشد. در این راستا سیستم های ذخیره ساز انرژی ('ESS) و ادوات FACTS می توانند به عنوان جبران ساز بسیار مفید در جهت کاهش نوسانات و افزایش میرایی در سیستم های قدرت به کار برده شوند [۴-۳].

ژنراتور القايي دوسوتغذيه (DFIG^r) به دليل هزينـه كـم مبـدلهـا و کنترل مستقیم توان های اکتیو و راکتیو یکی از متداول ترین انواع توربینهای بادی سرعت متغیر به شمار می آید [۵]. روتور این ژنراتـور از طریق یک مبدل دوجهته پشتبهپشت و استاتور آن بهصورت مستقیم به شبکه متصل می شود. به منظور کنترل این مبدل دوجهته از سه حلقه کنترلی به نامهای مبدل سمت شبکه ('GSC)، مبدل سمت روتور (*RSC) و یک حلقه کنترلی برای خازن لینک DC که این دو مبدل را به يكديگر متصل مي سازد استفاده مي شود [۶]. اخيرا مطالعات گستردهای بر روی سیستمهای کنترلی DFIG در راستای پایداری مطرح شده است که برخی از آنها عبارتاند از: تحلیل حساسیت [۶]، تحليل پايداري سيگنال کوچک [۸-۶]، تحليل مقادير ويژه [۹]، روشهای مبتنی بر بهینهسازی پارامترهای کنترلی در هر یک از مبدلهای DFIG [۱۲–۱۰]، روش فیدبک حالت [۱۳] و روش کنترل مقاوم H2 / Hw اله الله الله الله الله المنظور خاصى در جهت بهبود میرایی نوسانات و کنترل توان های یک توربین بادی مبتنی بر DFIG، مورداستفاده قرار گرفتهاند. در روشهای مبتنی بر بهینهسازی، پارامترهای کنترل کننده PI در هر یک از مبدل های ژنراتور القایی توسط الگوریتمهای هوشمند بهینه می شوند تا خروجی کنترل کننده با کے ترین خطابہ مبدل موردنظر اعمال شود. مشکل جدی کنترل کننده های PI وابستگی آن ها 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.

ازجمله روش های کاهش نوسانات در توان خروجی DFIGها استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی ابرخازنی (^مSCESS) است [۱۷]. در این سیستمها درصورتی که توربین بادی تحت تغییرات شدید باد دچار نوسان شود می توان توان موردنیاز شبکه را به صورت خیلی ساده توسط یک ابرخازن و یک مبدل DC-DC جبران کرد [۱۸]. از دیگر سیستمهای ذخیره ساز انرژی که در باس AC به منظور جبران توان راکتیو به کار برده می شوند می توان به سیستمهای ذخیره ساز انرژی

چرخ طیار(FESS) [۲۰-۲۰] و ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی (SMES^v) اشاره کرد [۲۱-۲۲]. در مطالعات پایداری برای سیستم قدرت، یکی از روش هایی که برای کاهش نوسانات فرکانس پایین (LFO) به کاربرده میشود طراحی کنترل کننده میرایی برای پایدارسازهای سیستم قدرت(PSS^۹) و یا ادوات FACTS است. در این راستا جبرانساز سری سنکرون استاتیکی (^{۲۰} SSSC) یکی از انواع ادوات FACTS نسل جدید است که بهصورت سری در خط انتقال قرار می گیرد و با توجه به ساختار خود می تواند شارش توان در خط انتقال را از خازنی به سلفی تبدیل کند [۲۴-۲۳]. روش های بسیاری برای طراحی کنترل کننده مناسب در SSSC مطرح شده است [۲۵-۲۶]. روش کنترل مقاوم غیرخطی بهمنظور بهبود میرایی و افزایش پایداری گذرا [۲۵]، روش های مبتنی بر الگوریتم های هوشمند جهت بهینهسازی پارامترهای کنترل کننده پیش فاز- پس فاز در طراحی هماهنگ PSS و ادوات جبرانساز [۲۷] ازجمله 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. به عبارت دیگر 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 به عنوان یک ابزار کنترلی بسیار قدرتمند جهت برآوردن خواستههای فوق ارائه می گردد. کنترل پیش بین مبتنی بر مدل یکی از روشهای کنترلی پیشرفته در زمینه فعالیتهای صنعتی و تحقیقاتی به حساب می آید [۲۸]. در این روش کنترلی با استفاده از مدل فرایند و مینیمم کردن یک تابع هدف سیگنالهای كنترلى قابل قبولى به دست مى آيد كه از أن براى طراحى پارامترهاى حلقه کنترلی استفاده می شود. از کاربردهای ۳CW در حل مسائل مربوط به پایداری سیستمهای قدرت میتوان به انتخاب سیگنالهای کنترلی مناسب برای پایدارساز سیستم قدرت [۲۹]، طراحی کنترل کننده میرایی برای یک سیستم HVDC^{۱۲} [۳۰]، کنترل توان های اکتیو و راکتیو در یک توربین بادی با مـدلسـازی معـادلات در فضای حالت [۳۲-۳۱]، کنترل توان های اکتیو و راکتیو در یک ریز شبکه جهت هماهنگی یک باتری و توربین بادی با در نظر گرفتن سرعت باد و مصرف شبکه [۳۳] و پیش بینی توان خروجی یک ریز شبکه جهت 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 به کارگیری برخی از روابط ریاضی و الگوریتم های هوشمند روند اجرای حل مسائل مربوط به مدل پیشبین را بهبود دهند. در این راستا مدل پیش بین غیر خطی با افست آزاد (Offset-Free) جهت کنترل پیشبین با رویکرد ...

طراحی جبران ساز استاتیکی وار (۳۰'SVC) [۳۵]، کنترل پیش بین مقاوم [۳۶] و کنترل پیش بین تابعی [۳۸-۳۷] جزو روش های پیشرفته تر مدل پیش بین هستند که نیازمند اجرای روابط ریاضی پیشرفته در حوزه مهندسی کنترل می باشند.

در این مقاله از کنترل پیش بین مدل تابعی (۲۰۱۴ (FMPC) به منظور افزایش پایداری در یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی نهایت با رویکرد کنترل توان های اکتیو و راکتیو در توربین بادی استفاده شده است. کنترل توان اکتیو در مبدل سمت شبکه با استفاده از یک کنترل کننده میرایی در ساختار SCESS انجام شده است. این ساختار به گونه ای طراحی شده که علاوه بر حفظ ولتاژ لینک DC ساختار به گونه ای طراحی شده که علاوه بر حفظ ولتاژ لینک DC توانایی کنترل توان اکتیو در GSC را داشته باشد. کنترل توان های اکتیو و راکتیو در مبدل سمت روتور با رویکرد انتخاب سیگنال های کنترلی مناسب برای اینورتر RSC اتخاذ شده است. علاوه بر همه این ها SSSC به توانهای استفاده شده که بتواند توان انتقالی در خط را کنترل کند و درنتیجه میرایی سیستم قدرت را افزایش دهد. به طور خلاصه نوآوری های مقاله حاضر تحت عناوین زیر قابل بیان است:

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

در ادامه مقاله، در بخش دوم به مدل سازی سیستم قدرت شامل: معادلات دینامیکی ژنراتور سنکرون، معادلات مربوط به مبدل های سمت شبکه و سمت روتور در DFIG، معادلات مربوط به طراحی کنترل کننده میرایی در SSES و SSSS، پرداخته شده است. بخش سوم شامل معرفی و مدل سازی استراتژی پیش بین و تطبیق آن با سیستم قدرت است. در بخش چهارم شبیه سازی سیستم تحت مطالعه و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه گیری 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 دومحوری استفاده شده است [۳۹]. در این مدل از تأثیرات راکتانس های زیرگذرا صرفنظر شده و فقط راکتانس های گذرای ژنراتور سنکرون در مدل سازی به کار گرفته می شوند. مدل سیستم تحریک شامل AVR-PSS از نوع IEEEI بوده و پارامترهای مربوط به آن در قسمت ضمیمه آورده شده است. در شکل ۱ نمودار تک خطی سیستم تحت مطالعه نشان داده شده است.



شكل ۱: دياگرام تكخطي سيستم قدرت تحت مطالعه

معادلات دینامیکی مدل دومحوری بـرای iامـین ژنراتـور سـنکرون توسط روابط زیر قابل.بیان است [۳۹]:

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

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

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \tag{(7)}$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{\tau_{ji}} [T_{mi} - \left[I_{di} E'_{di} + I_{qi} E'_{qi} - (I'_{qi} - I'_{di}) I_{di} I_{qi} + D_i \omega_i \right]$$
(*)

۲-۲- مدل ژنراتور القايي دوسوتغذيه

همان طور 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 بهصورت پشتبه پشت با یکدیگر ارتباط دارند. وظیفه این لینک DC حفظ تعادل توان بین دو مبدل است. در این مقاله از تکنیک برداری برای مدل سازی 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 کنترل کننده های RSC و GSC به صورت کامل بیان شده است. مراجع [۹-۶]، اطلاعات جامعتری در رابطه با نحوه مدل سازی کنترل کننده های مربوط به JDFIG

$$\begin{split} \dot{u}_{1} &= \omega_{rw_ref} - \omega_{rw} \\ i_{qrw_ref} &= Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) + Z_{i1}u_{1} \\ \dot{u}_{2} &= i_{qrw_ref} - i_{qrw} = Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) \\ &+ Z_{i1}u_{1} - i_{qrw} \\ \dot{u}_{3} &= Q_{sw_ref} - Q_{sw} \\ i_{drw_ref} &= Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) + Z_{i3}u_{3} \\ \dot{u}_{4} &= i_{drw_ref} - i_{drw} = Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) \\ &+ Z_{i3}u_{3} - i_{drw} \\ v_{qrw} &= Z_{q2}(Z_{q1}(\omega_{rw_ref} - \omega_{rw}) + Z_{i1}u_{1} - i_{qrw}) \\ &+ Zi_{2}u_{2} + s_{rw}\omega_{s}L_{mm}i_{dsw} + s_{rw}\omega_{s}L_{rr}i_{qrw} \\ v_{drw} &= Z_{q2}(Z_{q3}(Q_{sw_ref} - Q_{sw}) + Z_{i3}u_{3} - i_{drw}) \\ &+ Zi_{2}u_{4} - s_{rw}\omega_{s}L_{mm}i_{qsw} - s_{rw}\omega_{s}L_{rr}i_{drw} \end{split}$$

F-۲- مدل ریاضی برای GSC

مهمترین وظیفه در GSC، حفظ ولتاژ لینک DC در مقداری ثابت و کنترل توان راکتیو شبکه است. در شکل ۴ بلوک دیاگرام مبدل سمت شبکه با جزییات کامل نشان داده شده است. با توجه به این شکل از مقایسه سیگنال مرجع ولتاژ CC (Vdc_ref) با مقدار اندازه گیری شده (Vdc) توسط یک کنترل کننده IP سیگنال مرجع جریان در محور b تولید می شود. سپس از مقایسه سیگنالهای مرجع جریان در محور (iqgw_reg, idgw) مقادر اندازه گیری شده (idgw, reg) کنترل کننده IP سیگنالهای مرجع جریان را دو میآید. این کنترل کننده IP سیگنالهای پس از گذر از دو سیگنالهای کنترلی پس از جمع شدن با سیگنالهای جریان، سیگنالهای (vqgw,Vdgw) را جهت ارسال به PWM تولید می کنند. و درنهایت از پالسهایی که توسط PWM حاصل می شود جهت اعمال به سوئیچینگ اینورتر استفاده خواهد شد.



معادلات توصیف کنندہ مبدل سمت شبکہ توسط رابطـه زیـر بیـان مے شود [۶، ۹]:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{5} &= V_{dc-ref} - V_{dc} \\ \dot{i}_{dgw-ref} &= -Z_{bg} \Delta V_{dc} + Z_{ig} u_{5} \\ \dot{u}_{6} &= i_{dgw-ref} - i_{qgw} = -Z_{bg} \Delta V_{dc} + Z_{ig} u_{5} - i_{qgw} \\ \dot{u}_{7} &= v_{qgw-ref} - i_{qgw} \\ \Delta v_{dgw} &= Z_{pb} \dot{u}_{6} + Z_{pi} u_{6} = \\ Z_{pb} (-Z_{bg} \Delta V_{dc} + Z_{ig} u_{5} - i_{qgw}) + Z_{pi} u_{6} \\ \Delta v_{qgw} &= Z_{pb} \dot{u}_{7} + Z_{pi} u_{7} = \\ Z_{pb} (i_{qgw-ref} - i_{qgw}) + Z_{pi} u_{6} \end{aligned}$$
(7)



شکل ۲: ساختار DFIG به همراه سیستم ذخیره ساز ابرخازنی

RSC - ۳-۲ مدل ریاضی برای

مهمترین وظیفه مبدل سمت روتور(RSC)، کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی DFIG، استخراج بیشینه توان از باد و تأمین توان راکتیو موردنیاز ژنراتور القایی است. در این کنترلکننده توان اکتیو توسط مؤلفه vqw و ولتاژ توسط مؤلفه vdw کنترل می شود.



همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، کنترل ولتاژ توسط کنترل توان راکتیو با اندازه گیری ۷٫۰ و کنترل توان اکتیو با اندازه گیری سرعت توربین ۲۰۰ صورت می پذیرد. از مقایسه این سیگنالهای کنترلی با سیگنالهای مرجع توسط یک کنترل کننده PI برای هریک از پارامترها، سیگنالهای مرجع توسط یک کنترل کننده i برای هریک از پارامترها، سیگنالهای مرجع در محور q-b با مقایسه سیگنال مرجع جریان، سیگنالهای مرجع در محور q-b با مقایسه سیگنال مرجع جریان، سیگنالهای مرجع در محور q-b با مقایسه سیگنال مرجع جریان، سیگنالهای مرجع در محور q-b با مقایسه سیگنال مرجع دریان، سیگنالهای مرجع در محور g-b با مقایسه سیگنال مرجع دو کنتر سیگنالهای مرجع در محور q-b با مقایسه می تو دو کنترک کنده IP سیگنالهای مرجع در محور و g-b با مقایسه می کنال مرجع مریان سیگنالهای مرجع در محور و g-b با مقایسه می کنال مرجع مریان، سیگنالهای مرجع در محور و g-b با مقایسه سیگال مرجع مریان سیگنالهای مرجع در محور و g-b با مقایسه سیگال مرجع مریان سیگال خطایی و g-b با مقایسه می کنند که از سیگال مرجع در محور و g-b با مقایسه می کنال مرجع مریان سیگال مرجع در محور و g-b با مقایسه می کنان مرجع مریان سیگال مرجع در محور و g-b با مقایسه مرجع مریان مرجع مریان سیگال مرجع در محور و g-b با مقایسه می کنال مرجع مریان سیگال مرجع در محور و g-b با مقایسه می کننده و و کنتر و و g-b با مور و g-b با مور و g-b با مری مربع و و و و و و g-b با مربع و و g-b با مربع و و g-b با مربع و g-b با مربع و و g-b با مربع و و g-b با مربع و g-b با و g-b با مربع و g-b با و

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



SCEES -۵-۲ کنترل کننده مبدل

در این مقاله به منظور اطمینان کامل از حفظ ولتاژ لینک dc از یک سیستم ذخیره ساز انرژی ابر خازنی (SCEES) استفاده شده است. علاوه براین، یک کنترل کننده میرایی در SCEES طراحی شده که میتواند تحت تغییرات شبکه، توان اکتیو شبکه را به خوبی کنترل کند. ساختار این مبدل همان طوری 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 می شود. بهره برداری از مبدل dc/dc بسته به کلیدهای boost و boost می واند در مدهای boost و معورت پذیرد.

اگر کلید K۱ باز باشد بهرهبرداری در مد boost انجام می شود و اگر کلید K2 باز باشد بهرهبرداری در مد buck صورت می پذیرد. در مد buck وقتی کلید K1 بسته است به نسبت ولتاژ بانک خازنی و ولتاژ لینک DC می توان سهم روشن بودن کلید K۱ را به صورت S۱ توسط رابطه زیر تعریف کرد [۱۷]:

$$S_1 = \frac{V_{sc}}{V_{dc}} \tag{V}$$

همچنین در مد boost هنگامی که کلید K2 بسته است S2 به-صورت I-S1 تعریف می شود. در این مقاله نسبت ولتاژ بانک خازنی به ولتاژ لینک DC برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین زمان روشن بودن S1 برابر با ۲/۵ است. معادلات توصیف کننده سیستم SCEES به صورت روابط زیر قابل بیان است:

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

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 Cdc 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 [۳۳]:

$$\begin{cases} v_{ds} = m_c Z_{inv} V_{dc_sssc} Cos(\beta_s) \\ v_{qs} = m_c Z_{inv} V_{dc_sssc} Sin(\beta_s) \end{cases}$$
(9)

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

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

بلوک دیاگرام کنترلی SSSC برای مد خازنی به همراه کنترل کننده میرایی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه بـه شـکل ۷ بـا اضـافه شدن یک سیگنال کنترلی مبتنی بر X_F میتوان توان جـاری در خـط انتقال را بهمنظور کاهش نوسانات فرکانس پایین کنترل نمود.



شکل ۸: ساختار کنترلی برای MPC

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

$$\begin{cases} x(z+I) = F_k x(z) + G_k b(z) + H_k c(z) \\ k(z) = P_k x(z) \end{cases}$$
(17)

انتخاب تابع هدف طوری است که خروجیهای آینده در افق پیش بینی 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 پیش بین را می توان به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$F_{fit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z \left(k'(r+z) - k_{ref}(r+z) \right)^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z \Delta b(r+z)^2 \qquad (17)$$

با توجه به رابطه فوق، بردار پیش بینی که برای خروجی سیستم در نظر گرفته می شود به صورت یک ماتریس $m_a \times 1$ تعریف می شود که در آن m_a افق پیش بینی نامیده می شود. علاوه براین Δb نیز به صورت یک ماتریس m_b است که در آن m_b افق کنترلی نامیده می شود.

۳-۱- قیود اعمالی در کنترل پیشبین مدل

محدودیتهایی که در اجرای حل مسئله با استراتژی کنتـرل پـیش.بین به کار گرفته میشوند عبارتاند از :

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

با توجه به قیـود ذکرشـده، رابطـه زیـر را بـرای بیـان ریاضـی ایـن محدودیتـها میتوان توصیف نمود:

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

علاوهبراین بهمنظور کنتـرل سـیگنالهـای آینـده در MPC از یک بردار با طول *mb* که دارای عملکرد انتقال روبهجلو است اسـتفاده مـی-شود. این ماتریس انتقال روبهجلو طبق رابطه زیر توصیف می شود:



شکل ۷: ساختار کنترل کننده میرای مطرحشده برای یک SSSC

معادله ریاضی کنترلکننده میرایی در SSSC را میتوان بهصورت زیر بیان نمود:

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

$$(11)$$

۳-كنترل پيشبين

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 [۴۱-۴۰]. اطلاعاتی که توسط این روش پیش بینے مے شود به منظور به دست آوردن نقطه بھینه مطابق با معیارهای هر مسئله مورداستفاده قرار می گیرد. با توجه به این که پایه و اساس این روش مـدل فراینـد اسـت، بنـابراین مـیتـوان از روی ورودی و خروجیهای پیشبینی شده برای تخمین حالات فرایند نیز استفاده کرد. اندازه گیری های جدید از مدل فرایند که در هرلحظ و نمونه برداری می شود به داخل حلقه کنترلی تزریق می شود و بر مبنای این اندازه گیریهای بهدستآمده افق پیشبین، پیشبینی میشود. مزیت این استراتژی این است که در هر بازه از زمان نمونهبرداریشده بـا توجـه به قیدهای حاکم بر سیستم ، یک مسئله بهینهسازی مقید حل می گردد. درواقع محدودیت ها 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 بهینه سازی یک دنباله از متغیرهای کنترلی با طول مشخص و یا همان افق پیشبین برای رفتار آینده سیستم محاسبه می شوند. با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۸، قیود

$$\begin{cases} \Delta \hat{B}^{T} = [\rho^{-0} \Delta b(r), ..., \rho^{-(m_{b}-l)} \Delta b(r+m_{b}-l)] \\ \hat{X}^{T} = [\rho^{-l} x(r+l), ..., \rho^{-m_{a}} x(r+m_{a})] \\ \hat{K}^{T} = [\rho^{-l} k(r+l), ..., \rho^{-m_{a}} k(r+m_{a})] \end{cases}$$
(1A)

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

$$\begin{cases} \hat{x}(r+1) = \hat{F}\hat{x}(r) + \hat{G}\Delta\hat{b}(r) \\ \hat{k}(r) = \hat{P}\hat{x}(r) \end{cases}$$
(۱۹)
که در آن:

$$\hat{F} = \frac{F}{\rho}, \hat{G} = \frac{G}{\rho}, \hat{P} = \frac{P}{\rho}$$
(7.)

با جایگزینی رابطه (۲۰) در معادله (۱۹) میتوان تابع هدف جدیـد

را بهصورت زیر بیان نمود:

$$\hat{F}_{fit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z \left(\hat{k}(r+z) - k_{ref}(r+z) \right)^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z \Delta \hat{b}(r+z)^2 \qquad (\Upsilon)$$

برای قیدهای اعمالشده معادله (۱۴) را میتوان بهصورت زیر جایگزین نمود:

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

پس از حـل معادلـه (۲۱) مسـیر ورودی بایـد برحسـب متغیرهـای استاندارد بهصورت رابطه زیر بازنویسی شود:

$$\Delta B^{T} = \left[b^{0} \Delta \hat{b}(r), \dots, b^{(m_{b}-1)} \Delta \hat{b}(r+z), \dots, \Delta b(r+m_{b}-1) \right]$$
(T7)
به طور خلاصه ترتیب حل مسئله برای کنترل کننده پیش بین تابعی
را میتوان در مراحل زیر دنبال کرد:

تعیین مقدار مناسب برای پارامتر p

- جایگذاری ماتریسهای (F,G,P) و متغیرهای (B,X,K) در معادلات (۲۰) و (۲۱).
- اعمال قیود بر اساس مشخصات مسئله موردنظر توسط معادلات (۲۲) و (۲۳) در تابع هدف.
- اجرای روند بهینه سازی برای تابع هدف مبتنی بر توابع لاگر
 و محاسبه ضرایب این تابع.
- و پردازش سیگنالهای کنترل ورودی انتخابشده توسط توابع لاگر با استفاده از معادله (۱۷).
- مرتبسازی ورودیها بر اساس معادله (۲۳) و اعمال آن به سیستم موردنظر.

$$\Delta B = \left[\Delta b(r), \dots, \Delta b(r+z), \dots, \Delta b(r+m_b-1)\right]$$
(1Δ)

$$\Gamma_g = \frac{\sqrt{1-b^2}}{z-b} \left(\frac{z^{-1}-b}{1-bz^{-1}}\right)^{g-1}, 0 \le b \le 1$$
(19)

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:

$$\Delta b(r+z) \approx \sum_{g=1}^{m} a_g \cdot f_g(z) \tag{14}$$

در رابطه بالا f_s ترانهاده شبکه توابع لاگر در معادله (۱۶) بوده و gبردار پارامتر نامیده می شود . با توجه به رابطه فوق در کاربردهای تئوری برای m معمولاً مقداری کوچکتر از ۱۰ در نظر گرفته می شود و مقدار انتخاب آن به کاربر بستگی دارد. به عبارت دیگر انتخاب مقادیر بزرگتر برای m تخمین مسیرهای ورودی برای توابع لاگر را افزایش می دهد. با توجه به این که افزایش افق پیش بینی منجر به بهبود و عملکرد مناسب در رفتار حلقه بسته این کنترل کننده می شود 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 پیش بین را با هدف ترکیب توابع لاگر و ضریب وزنی نمایی می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

۳-۳- تطبیق استراتژی مطرحشده برای سیستم تحت مطالعه در این قسمت جهت اجرای استراتژی پیشبین به روی سیستم تحت مطالعه، نیاز است که روابط مطرحشده 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:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + ER\\ Y = CX + DU \end{cases}$$
(14)

در رابطه بالا X بردار حالت سیستم بوده و برای سیستم موردمطالعه در این مقاله بهصورت 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 $U=[Q_{sw_ref}, \omega_{rw_ref}, P_{gw_ref}, P_{L_ref}]^T$ به عنوان بردار ورودی کنترل پیش بین، متغیر D برابر با صفر، و همچنین متغیر R بردار اختلال است که در این مقاله برابر با صفر است.

بهمنظور اصلاح پاسخ بهینه بهدستآمده از کنترل پیشبین قیود انتخابی باید در محدوده مجاز تعریف شده باشند. بنابراین در این مقاله قیود موردنظر جهت رسیدن به اهداف موردنظر بهصورت زیر تعریف می-شوند:

- کنترل توانهای اکتیو و راکتیو DFIG با رویکرد انتخاب بردارهای مرجع مناسب برای مبدل سمت روتور با محدودیت ($vdrw_min \le vdrw \le vdrw_max, vqrw_min \le vqrw_max$).
- کنترل توان اکتیو مبدل سمت شبکه با رویکرد انتخاب خروجی مناسب برای کنترل کننده میرایی در سیستم ذخیره ساز انرژی ابرخازنی با محدودیت (Vys_min ≤ Vys ≤ Vys_max).
- کنترل توان جاری شدہ در خط با رویکرد انتخاب خروجی $(X_{F_mim} \leq X_{F_mim} \leq SSSC)$ با محدودیت $X_{F} \leq X_{F_max}$

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

$v_{drw_{min}}$		$v_{drw_{max}}$
$v_{qrw_{min}}$	-0 < u < 1 -	v _{qrw_max}
$V_{\gamma s}_{\min}$	$-0 \le u \le 1 -$	$V_{\gamma s}$ max
$X_{F_{\min}}$		$X_{F_{\max}}$

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 :

$\begin{bmatrix} E'_{qi} \\ \min \end{bmatrix}$	[0]	[0.3]	$\begin{bmatrix} E'_{di} \\ \max \end{bmatrix}$
E'_{di}_{\min}	0	0.2	E'_{di_max}
$u_{3_{\min}}$	$\begin{vmatrix} = \\ 0 \end{vmatrix} \le x \le$	[►] 0.7 ⁼	$u_{3_{max}}$
u_{5}_{\min}	[0]	0.4	u_{5} _max

علاوه بر این، پارامترهای استراتژی کنترل پیشبین که در شبیه سازی به کار گرفته شده به صورت مقادیر: Δ=۲۰۰ ، m_b=۲۰۰ m=۷ ، ρ=۱/۰۸ و b=۰/۲۴ تنظیم شده است. همچنین مقدار ضرایب ماتریس های وزنی به ترتیب برابر G=0.14×I_{ma×ma} ، G=0.14 انتخاب شده است.

۴ – نتایج شبیهسازی

با توجه به شکل ۱، در این بخش جهت اجرای شبیه سازی از یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی نهایت مجهز به یک ژنراتور سنکرون با قدرت ۲۳۰MVA، یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG با توان تولیدی ۸۰ مگاوات مجهز به سیستم ذخیره ساز انرژی ابر خازنی و یک SSSC با قدرت ۵۰MVA که در خط دوم منتهی به شین بی نهایت قرار گرفته، استفاده شده است. مزرعه بادی از طریق یک ترانسفور ماتور ۲۳/۱۶۱KV 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 ترانسفور ماتور افزاینده و دو خط انتقال موازی به یک شبکه قدرت بزرگ یا شین بی نهایت انتقال می باید. سایر اطلاعات مربوط به این سیستم در قسمت ضمیمه ارائه شده است.

بهمنظور اجرای استراتژی مطرحشده برای کنترل پیشبین در محیط MATLAB-SIMULINK، با اعمال یک خطای اتصال کوتاه سهفاز در باس بینهایت، نتایج شبیهسازی در حوزه زمان برای سیستم نشانداده شده در شکل ۱ مورد ارزیابی قرار می گیرد. این خطا در زمان ۱ ثانیه به سیستم اعمال شده و مدت ۱/۰ ثانیه طول می کشد تا این خطا رفع شود. علاوه بر این، بهمنظور 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 متربرثانیه تا ۱۲ متربرثانیه افزایش یافته و سرعت روتور DFIG در حالت فوق سنکرون (۱/۰۹p.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 میشود که با افزایش سرعت باد از ۱۱/۵ متربرثانیه تا ۱۲ متربرثانیه میشود که با افزایش سرعت باد از ۱۱/۵ متربرثانیه تا ۱۲ متربرثانیه توان اکتیو DFIG از ۷۰/۱ متربرثانیه تا ۱۲ متربرثانیه دوند نوسان کوچک در محدوده مناسبی میرا می شود. در شکل ۹- د دیده می شود که با افزایش سرعت باد، سرعت روتور DFIG افزایش دیده می شود که با افزایش سرعت باد، سرعت روتور DFIG افزایش دیده و در سرعت ۱۲ متربرثانیه از باد به مقدار ۱/۰۹ پریونیت رسیده است.



شکل ۹: نتایج شبیهسازی پاسخ گذرا برای سناریوی اول

پاسخ ولتاژ باس مشترک (Vpcc) 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 کنترل کننده-های پیشبین عملکرد مطلوبتری نسبت به کنترل کننده PI دارند.

سناریوی دوم: در این سناریو سرعت باد از ۱۱ متربرثانیه تا ۱۰/۵ متربرثانیه 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. همان طوری که از شکل ۱۰ – ب دیده می شود با کاهش سرعت باد دامنه توان راکتیو از ۱۰/۰۰ – تا ۱۳/۰ – تغییر یافته است. از این نتیجه می شود که هر سه کنترل کننده مطرح شده عملکرد خوبی را آنها بهبود میرایی نوسانات است که در این میان کنترل کننده می دهد. با توجه به شکل ۱۰ – چ با کاهش سرعت باد مقدار توان اکتیو از ۱۹/۰ تا ۱۶/۰ کاهش سرعت باد مقدار توان می دهد. با توجه به شکل ۱۰ – چ با کاهش سرعت باد مقدار توان می دور با زر ۱۶ کار کاهش یافته است. این در حالی است که سرعت روتور DFIG در شکل ۱۰ – د از مقدار ۱ پریونیت در حالی سرعت روتور مقدار ۱۹/۰ پریونیت کاهش یافته است. عملاوه بر این

پاسخ تغییرات ولتاژ باس مشترک VPcc در شکل ۱- ه و توان اکتیو جاری شده در خط دوم در شکل ۱۰- و نشان داده است. در این سناریو نیز همانند سناریوی اول به وضوح دیده می شود که کنترل-کننده FMPC نسبت به MPC و PI، عملکرد مطلوب تری در جهت بهبود میرایی و کاهش فراجهش، فروجهش و زمان نشست دارد.

سناریوی سوم: در این سناریو سرعت باد از ۱۰ متربرثانیه 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 میشود که توان اکتیو DFIG از ۸/۵۸ تا ۲۰/۴ کاهش یافته است. میشود که توان اکتیو DFIG از ۸/۵۸ تا ۲۰/۴ کاهش یافته است. سرعت باد نشان داده شده است. در شکل ۲۱ - ج نیز دیده سرعت باد نشان داده شده است. در شکل ۲۱ - و نیز به موجنین در شکل ۲۱ - د کاهش سرعت روتور توربین با کاهش سرعت باد نشان داده شده است. در شکلهای ۲۱ - و زیز به مرعت باد نشان داده شده است. در شکلهای از مواد و نیز به مرعت باین داده شده است. در تمامی شکلهای فوق بهوضوح دیده میشود که در PMP مدتزمان حضور نوسانات و دامنه آن نسبت به MPC و IP کمتر بوده و توانسته است پایداری سیستم را در مستم د مطلوبی حفظ کند.



در همه سناریوهای مطرح شده، زمان نشست متوسط در FMPC برابر با ۱/۵۷ در MPC برابر با ۲/۷۱ و در IP برابر با ۵/۶۸ ثانیه به دست آمده است. علاوه بر این، طول مدتزمان شبیه سازی در FMPC برابر با ۵۸۴/۱۵۴ در MPC برابر با ۶۹۳/۳۴۶ و در IP برابر با ۵۶۹/۰۱۸ ثانیه بوده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت FMPC نسبت به ۵۲۵ ازلحاظ سرعت، عملکرد و همچنین زمان FMPC اجرای شبیه سازی، پاسخ بهتری را فراهم می آورد، اما نسبت به FMPC کمی تأخیر زمانی دارد که در مقایسه با نتایج بسیار مطلوب FMPC می توان 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. همان طوری که از نتایج جدول ۱ مشخص است در هر سه سناریو نسبتهای میرایی بهدستآمده از هر دو روش FMPC و MPC و MPC ین تسبت به IP بهمراتب بهتر بوده است. علاوه براین، 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 درنتیجه از پایداری بیشتری برخوردار است. به طور مثال با نسبت میرایی برای کنتده IP برابر با ۲۷۵ است. این در حالی است که نسبت میرایی برای OPM و ول، دیده می شود که میرایی برای کنترل کننده IP برابر با ۲۷۵ است. این در میرایی برای کنترل کننده IP برابر با ۲۷۵ است. این در میرایی برای کنترل کننده IP برابر با ۲۹۵ است. این در میرایی برای کنترل کننده IP برابر می MPC و مناز با ۲۵ میرایی برای کنترل کننده IP برابر می میرایوی دوم نیز نسبت میرایی برای کنترل کننده IP برابر است. به طور مشال در میرایی برای کنترل کننده IP برابر می MPC و می میرابر دو میرایی برای کنترل کننده IP برابر می میرابر دو دوم نیز نسبت میرایی برای کنترل کننده IP برابر می می می دوم نیز نسبت

وم، نتایج نسبت میرایی مربوط به MPC ،PI و FMPC به	سناريوي سو
ا ۰/۲۴۰، ۵۴۹/۰ و ۷۱۶/۰ به دست آمده است.	ترتيب برابر ب

۶-نتیجهگیری

در این مقاله روش FMPC به عنوان یک روش تحلیلی در بهبود یایداری سیستمهای قدرت مطرح شد و با دو روش کنترل پیش بین مدل و کنترل کننده 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 داده نمایی وزنی استفاده شد. این روش پیشنهادی تحت عنوان FMPC در سیستم قدرت تکماشینه مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از به کارگیری 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 پیش بین در دو حالت FMPC و MPC ، کنترل توانهای اکتیو و راکتیو در مبدل سمت روتور بهمنظور به دست آوردن سیگنالهای کنترلی مناسب (vqrw, Vdrw) جهت بهبود هر چه بیشتر یایداری 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.

سناريو ها	I	Ы	М	PC	FMPC			
5.5	مقدار ويژه	نسبت میرایی	مقدار ويژه	نسبت میرایی	مقدار ويژه	نسبت میرایی		
سناريوی اول	-•/Y۶±Y/٩λi	•/747	-1/YA±1/A1i	•/٧•١	-۲/• 1±1/A1i	•/٧۴٣		
Vw=vr m/s	$V_W= i r m/s$ $- \cdot / V \lambda \pm r / i i i - / r$		-1/84±1/94i	•/۵۶۲	-۲/• Y±1/98i	۰/۷۳۱		
$\omega_r = 1/.9 \text{ p.u.}$	-•/89±7/18i	•/٣٣	-1/V8±1/9Ai	•/۶۶۴	-5/21±1/99i	•/٧٨٣ •/٨١۶		
	-•/ \ \$±7/9%i	۰/۲۷۵	-1/8Y±Y/+ 4i	•/۶۶٣	-۲/٩1±۲/•۶i			
	-•/۵A±۲/9&i •/ ١٩٣		-1/23×1/41i	۰/۶۰۷	-7/• 4±7/39i	•/949		
سناريوی دوم	-•/\\\±٢/٩\i	•/٢٨٣	-1/194±7/84i	۰/۵۸۲	-7/77±7/87i	•/٧٢•		
V _W =11 m/s	$V_W=11 \text{ m/s}$ /YF±T/- βi -/TTD		-1/98±7/87i	•/۶۵۶	-5/+ a±5/55i	•/۶۷٨		
$\omega_r = v p.u.$	-•/۶λ±۲/۹۲i	•/٢٢٧	-1/20±1/98i	•/۶٨۶	-۲/۹۷±۱/۹۸i	۰/۸۳۲		
	-•/V•±٣/•Yi	•/٢٢٢	-1/84±7/28i	•/۵۵•	-5/23#±7/22i	•/٧•۴		
	-•/٨١±٣/٣۶i	•/٢٣۴	-1/80±1/98i	•/۶۵۱	-1/9A±1/94i	•/٧١۴		
سناريوی سوم	-•/٧٩±٣/١۶i	•/٢۴٢	-1/144t/+8i	۰/۶۶۷	-7/79±7/•9i	۰/۸۰۴		
Vw=A m/s	-•/\XT±T/TTi	•/٢۴٧	-1/V9±7/11i	•/۶٣۴	-7/11±7/19i	•/۶٩۴		
$ω_r = \cdot / v $ γ p.u.	-•/VV±٣/١۵i	•/٣٧	-1/8Y±Y/89i	·/۵۲۷	-1/95±7/99i	·/۵۸۵		
	-•/ \ ۴±٣/٣٩i	•/٢۴•	-1/24±7/84i	•/۵۴۹	-۲/۳۹±۲/۳۳i	۰/۷۱۶		
	-•/Υλ±٣/•٧1 •/Υ۴۶		-1/87±7/48i	•/۴۳١	-7/78±7/48i	•/۶۳۳		

جدول ۱: مقادیر ویژه برای سیستم موردمطالعه تحت سناریوهای متفاوت

ضميمه

در حالت کلی توان مکانیکی یک توربین بادی سرعت متغیر که به
آئرودینامیک آن بستگی دارد بهصورت رابطه زیر بیان می شود [۴۳]:

$$P_{\omega t} = \frac{1}{2} \rho_{\omega t} . K_{\omega t} . D_{\omega t}^{3} . D_{\omega t} (\lambda_{\omega t}, \beta_{\omega t})$$
 (۲۵)
در رابطه فوق، $D_{\omega t}$ ضریب راندمان است که برای یک توربین

$$D_{\omega t}(\Phi_{S},\beta_{\omega t}) = d_{1}\left(\frac{d_{2}}{\Phi_{S}} - d_{3}\beta_{\omega t} - d_{4}\beta_{\omega t}^{d_{5}}\right)$$

$$-d_{6}\exp\left(\frac{-d_{7}}{\Phi_{S}}\right)$$
(YF)

$$(\Phi_{S})$$
 که در آن:
 $\Phi_{S}^{-1} - (\Gamma_{S} + d, R, 1^{-1}) = I_{S} (R, R, 3)$

$$\Phi = \left[\left(\lambda_{\omega t} + a_8 p_{\omega t} \right) - \left[a_9 (p_{\omega t} + 1) \right] \right) \quad (\uparrow \uparrow)$$

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

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

استفادهشده در مقاله	ىترھاي رياضي	ول ۲: فهرست یاراه	جد
		, <u>,</u> ,	

P _{wt}	توان گرفتهشده از توربین بادی برحسب وات	P_{dc}	توان اکتیو خازن لینک DC
ρωι	چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر مترمکعب	P _{rw}	توان اكتيو مبدل سمت روتور
K _{wt}	سطح جاروب شده از پرهها برحسب مترمربع	P_{gw}	توان اكتيو مبدل سمت شبكه
V _{wt}	سرعت باد برحسب متربرثانيه	C_{dc}	ظرفیت خازن لینک DC
$D_{\omega t}$	ضريب عملكرد پره	V _{dc}	ولتاژ خازن لينک DC
$\beta_{\omega t}$	زاويه پيچش 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
<i>d</i> ₁ – <i>d</i> ₉	ضرايب ثابت	Z_{q3} & Z_{i3}	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم سرعت RSC
R_b	شعاع پره برحسب متر	İdrw_ref	کنترل جریان مرجع در محور d برای RSC
ω_b	سرعت زاویه ای پره بر حسب رادیان بر ثانیه	i _{qrw_ref}	RSC کنترل جریان مرجع در محور q برای
L _{ss}	اندوكتانس خودى استاتور	Q_{sw_ref}	توان راكتيو مرجع
Lrr	اندوکتانس خودی روتور	Wrw_ref	سرعت مرجع
L _{mm}	اندوكتانس متقابل	Z_{bg} & Z_{ig}	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم ولتاژ خازن لینک DC
Rs	مقاومت استاتور	Z_{pb} & Z_{pi}	ضرایب کنترل کننده PI برای تنظیم جریان GSC
R _r	مقاومت روتور	iqgw_ref	GSC کنترل جریان مرجع در محور q برای
i _{ds}	جریان استاتور در محور d	V _{dc_ref}	ولتاژ مرجع از خازن لینک DC
iqs	q جریان استاتور در محور q	$Z_{b\beta} \& Z_{i\beta}$	ضرایب کنترل کننده PI
i _{dr}	جریان روتور در محور d	$ au_{beta}$	ثابت زمانی تأخیری برای کنترل کننده زاویه پیچ پره
Vds	جریان روتور در محور q	P_{gw}	توان اندازه گیریشده توربین بادی برای کنترل پره
Vdr	ولتاژ ترمینال استاتور در محور d	Pgw_ref	توان مرجع توربین بادی برای کنترل پره
v_{qs}	q ولتاژ ترمینال استاتور در محور	<i>x(z)</i>	بردار حالت برای MPC
V _{dr}	ولتاژ ترمینال روتور در محور d	<i>b(z)</i>	بردار ورودی برای MPC
Vqr	ولتاژ ترمینال روتور در محور q	<i>c(z)</i>	بردار اغتشاشات برای MPC
Ht	ضریب ثابت اینرسی توربین بادی	k(z)	بردار خروجی برای MPC
Hg	ضریب ثابت اینرسی ژنراتور	Z	زمان نمونەبردارى MPC
ω_t	سرعت زاويهاي توربين بادي	G_z	ماتريس وزنى تابع هزينه
ωr	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 _{tg}	گشتاور شفت	kref(r+z)	مسير مرجع آينده سيستم
Tew	گشتاور الکتریکی توربین بادی	$\Delta b(r+z)$	بردار تلاش كنترلى
Kı	ضریب میرایی توربین		نسبت تبدیل برای ترانسفورماتور کوپلینگ sssc
Kg	ضریب میرایی ژنراتور	Zinv	شاخص مدولاسيون SSSC
K _{tg}	ضریب میرایی کوپل شده بین شفت و جرم	V _{dc_sssc}	ولتاژ خازن لینک dc برای sssc
L _{tg}	انعطافپذیری شفت	β_s	زاویه فاز ولتاژ تزریقی برای SSSC

پارامترهای مربوط به ژنراتور سنکرون																
Generator	Rated M	VA	Rated KV	Powe	ower Factor		(pu) X'_d (pu)		$X_q(pu)$	X'_q (pu	l)	τ'_{do}	τ'_{qo}	H(s)	$\omega_s(pu)$	
	۱۲۳۰		۱۵	٠/٩٧۵	lagging	• /٨	۹۷۹	۰/۲۹۲۵	•/949	•/949	>	٧/۴	۰/۵	۶/۴	١	
Exciter	KA		$T_A(\mathbf{s})$		KE	T_E	(s)	K_F	$T_F(\mathbf{s})$	Ax		B_X				
	۲۰۰		•/•)		۱ •/٣		'14	•/•۶۳	۰/۳۵	•/••٣	٩	۱/۵۵				
بالمسابع المسابع المساب																
<i>Р</i> =۵ МW	V=•/	۶٩KV	$R_s = \cdot / \cdot$	۴۲pu	$R_r = \cdot / \cdot \cdot$	۵ pu	Cda	=•/• \ F	$L_{mm} =$	۲/۹pu	L	_{rr} =٣/•۵	۶pu	$L_{ss} = \Upsilon / \cdot \Upsilon $) pu		
$X_{tg} = \cdot / \Delta \Delta p.u$. <i>K</i> _i = -	•/∆pu	$K_{tg} = \Upsilon/$	۵pu	$L_{tg} = \cdot / 9$	rpu	Hi	=∙/•∆pu	$H_g=1$	۰/۲pu	$Z_{ql} = \Lambda \Delta$		2	Z _{i1} =٩/٢		
$Z_{q2} = \Lambda / \mathcal{S}$	$Z_{i2}=$	۳/۸۷	$Z_{q3} =$	۱۵	Z _{i3} =٩/٢		Z_{b_2}	_g =۱۷/۳۵	$Z_{ig} = V$	•/۴۳	$Z_{pb} = 1$ ۲		$Z_{ib} = \Lambda/\Delta \Upsilon$			
$\beta_{wt_min} = \bullet$	$\beta_{wt_max} =$	۳۰ (deg)	$Z_{b\beta}=1$	$d_l = \cdot / \Upsilon \Upsilon$		۲	a	d2=119 d3=•/90		1954	۵۴ d4=		$d_4 = \cdot / \Lambda$		d5=•/٩۵۵	
d6=9/191	$d_7 = 1$	1///٩	$d_{\delta}=1$	/9۵	$d_9=\cdot/\cdot hh$		$R_b=1/1\mathcal{F}$ m —		-	_		_				
	·		•		(±0 •	MVA	درت (R	SSSC با ق								
S=ƥ MVA	V=191 K	V F=9	• HZ I	?=•/• \	L=•/	٠٢	Vdc	$V_{dc} = \mathbf{f} \cdot KV \qquad \qquad C_{dc} = 1 \mathbf{V} \Delta \mu F$		ΔµF	$Z_{b_sssc} = \cdot / \cdot \cdot \lambda \Delta$		۰۱۵	$Z_{i_sssc}=\cdot/\Delta$		
$K_F = \cdot / \mathcal{F} \lambda$	$K_A = \cdot / \Upsilon$)	T_{W}	=\• Z	_{nv} =1/۶人	-			-	- –		-		-			
خطوط انتقال																
$R_{TLI}=R_{TL2}=\bullet/\bullet\bullet\bullet\bullet\Delta \text{ p.u.}$						$X_{TLI} = X_{TL2} \cdot / \cdot \cdot Y p.u.$										
SCESS																
C=℃ mF	$C_{ees}=\pmb{\forall \cdot F}$	Lees= $\Delta \cdot 1$	mH Vs	2=7 KV	V _{dc} =۴	KV	$K_C = \cdot / \Lambda \mathcal{F}$ $K_D = \cdot / \Upsilon \mathcal{F}$ $K_P = \Upsilon / \mathcal{F} \Delta$ $T_P = \cdot / \mathcal{F} \mathcal{F}$						$T_W = 1 \cdot$			

جدول۳: پارامترهای مربوط به سیستم تحت مطالعه

- [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, "Backto-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 environ-mental protection: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, 2011.

مراجع

- [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. Praghnesh 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

- [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. Muyeen, "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.

زيرنويسها

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

- [19] F. Islam, A. Al-Durra and S. M. Muyeen, "Smoothing of wind farm output by prediction and supervisorycontrol-unit-based FESS," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, 2013.
- [20] X. Sui, Y. Tang, H. He and J. Wen, "Energy-storagebased low-frequency oscillation damping control using particle swarm optimizationn 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 اباذری و امید مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت

با به کار گیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده 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

¹ Energy Storage sysytem

² Doubly-Fed Induction Generator

³ Grid Side Converte

⁴ Rotor Side Converte

12 High Voltage Direct Current

13 Static Var Compensator

14 Functional Model Predictive Control