



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 14, No. 1, 2023  
Research Paper

## Improving the stability of the DFIG power system in the presence of SSSC in a nonlinear manner

Zabihollah Faramarzi<sup>1</sup>, Saeed Abazari<sup>\*2</sup>, Said Hoghoughi<sup>3</sup>, Navid Reza Abjadi

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>4</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

### Abstract:

In this paper, the problem of improving the stability of the power system with DFIG and in the presence of SSSC using nonlinear method is discussed. The nonlinear controller is designed by the multi-input backstepping method with a sliding mode observer. This controller is applied simultaneously to the excitation system of synchronous generators and the rotor side converter in DFIG and SSSC in a way that improves the stability of the power system compared to the linear and nonlinear methods described in this paper. The control coefficient matrices are adjusted using intelligent algorithms in such a way that the stability of the system is more optimized. Practical constraints on the system are considered in selecting the control inputs. The designed controller is robust to changes in the operating point and the location of the disturbance. The performance of the designed controller in a 39-bus, 10 machines NEW ENGLAND network including DFIG generators and in the presence of SSSC is simulated and investigated using MATLAB software.

**Keywords:** Stability, Control of multi-input Backstepping, Sliding Mode Observer, DFIG, SSSC.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2022.132187.1536>

مقاله پژوهشی

بهبود پایداری سیستم قدرت دارای DFIG در حضور SSSC به روش غیرخطی

ذبیح الله فرامرزی<sup>۱</sup>، سعید اباذری<sup>۲\*</sup>، سعید حقوقی<sup>۳</sup>، نوید رضا ابجدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران

faramarzi\_z62@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران

abazari-s@eng.sku.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران

said\_hoghoughi@yahoo.com

۴- دانشیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران

navidabjadi@yahoo.com

**چکیده:** در این مقاله به مسئله بهبود پایداری سیستم قدرت دارای DFIG<sup>۱</sup> و در حضور SSSC<sup>۲</sup> به روش غیرخطی پرداخته شده است. کنترل کننده طراحی شده از نوع پسگام چندورودی<sup>۳</sup> به همراه روینگر مد لغزشی<sup>۴</sup> است. این کنترل کننده به طور همزمان روی سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون و مبدل سمت رتور در DFIG و SSSC به نحوی اعمال می شود که پایداری سیستم قدرت را در مقایسه با روش های خطی و غیرخطی بیان شده در این مقاله بهبود بخشد. ماتریس های ضرایب کنترل کننده با به کارگیری الگوریتم های هوشمند به نحوی تنظیم می شود که سیستم به نحو مطلوب پایدار شود. در انتخاب ورودی های کنترلی، محدودیت های عملی روی سیستم در نظر گرفته شده است. کنترل کننده طراحی شده نسبت به تغییر نقطه کار و محل اختلال مقاوم است. کارایی کنترل کننده طراحی شده در یک شبکه ۳۹ باسه، ۱۰ ماشین استاندارد NEW ENGLAND شامل DFIG و در حضور SSSC با استفاده از نرم افزار متلب، شبیه سازی و بررسی شدند.

**واژه های کلیدی:** پایداری، کنترل پسگام چندورودی، روینگر مد لغزشی، DFIG، SSSC

۱- مقدمه

فسیلی و هسته ای شده است؛ به طوری که در برخی از کشورهای پیشرفته مانند آلمان و فرانسه نیروگاه های برق هسته ای را تا حد امکان با نیروگاه های بادی جایگزین کرده اند؛ برای نمونه، در کشور آلمان ۵ گیگاوات توان نیروگاه هسته ای را با ۱۰۰۰ عدد توربین بادی بر مبنای ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه جایگزین کرده اند. نیروگاه های بادی تنوع ساختاری زیادی دارند. نیروگاه های بادی مبتنی بر DFIGها موسوم به نیروگاه های تایپ C هستند. امروزه نیروگاه های نسل جدید تایپ D هم مطرح شده اند که مزایایی نظیر امکان حذف گیربکس، ساختار مقاوم و نیاز به نگهداری و تعمیرات کمتری دارند؛ ولی به دلیل اینکه نیاز به تجهیزات الکترونیک قدرت با توان حداقل

با رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مسائل زیست محیطی و ایمنی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد، انرژی خورشید به علت رشد فناوری، زیرساخت های مناسب، هزینه کمتر، کاهش گازهای گلخانه ای و در دسترس بودن فراوان جایگزین منابع انرژی

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

نام نویسنده مسئول: سعید اباذری

نشانی نویسنده مسئول: : ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق

به بهبود عملکرد سیستم قدرت منجر می‌شود؛ زیرا این روش‌ها مستقل از نقطه‌کارند و بیشتر به صورت کنترل‌کننده سراسری عمل می‌کنند. در [۹] از روش خطی‌سازی با فیدبک خروجی برای بهبود پایداری در یک سیستم قدرت گسترده استفاده شده است؛ استفاده از این روش، نیاز به بررسی دینامیک داخلی سیستم دارد و در بعضی موارد عملاً امکان اعمال این روش به دلیل وجود مشتقات مراتب بالا و وجود ناپیوستگی در حالت‌های تعریف‌شده سیستم وجود ندارد. در [۱۰] از روش غیرخطی پسگام به منظور بهبود پایداری سیستم قدرت برای سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون استفاده شده و ظرفیت عناصر FACTS برای بهبود پایداری در نظر گرفته نشده است. بیشتر روش‌های غیرخطی استفاده‌شده یا در سیستم تک‌ماشینه استفاده شده‌اند یا از عناصر FACTS و DFIG به طور هم‌زمان برای بهبود پایداری استفاده نشده است [۱۱-۱۴].

استفاده از الگوریتم‌های هوشمند نظیر PSO با مزایایی چون سادگی روش، کاهش حافظه مصرفی و سرعت همگرایی بالا در بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده مؤثر است [۱۵].

به کارگیری هم‌زمان کنترل‌کننده غیرخطی به همراه رویکرد مد لغزشی و بهره‌گیری از الگوریتم PSO در یک سیستم قدرت شامل DFIG و عنصر FACTS حاشیه امنیت پایداری را بهبود می‌بخشد. در این مقاله، به مسئله بهبود پایداری یک سیستم قدرت چندماشینه شامل DFIG و در حضور عنصر SSSC پرداخته شده است.

به طور خلاصه مزایا و نوآوری روش به‌کاررفته به صورت زیر بیان می‌شود:

بهره‌گیری از روش پسگام چندورودی روی سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون و DFIG؛

به کارگیری رویکرد مد لغزشی روی حالت‌های غیر قابل اندازه‌گیری سیستم؛

تعیین ماتریس‌های ضرایب کنترل‌کننده به‌کاررفته با استفاده از الگوریتم هوشمند PSO؛

تعیین ضرایب هم‌زمان DFIG، SSSC و سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون با توجه به اثر متقابل آنها.

در ادامه، ابتدا مدل استفاده‌شده برای ژنراتورهای

برابر با توان تولیدی ژنراتور و همچنین، فیلترهایی با مقادیر نامی ۱ پریونیت دارند، هزینه و قابلیت اطمینان در آنها کاهش می‌یابد و همچنان، تایپ C رایج و شایان توجه است.

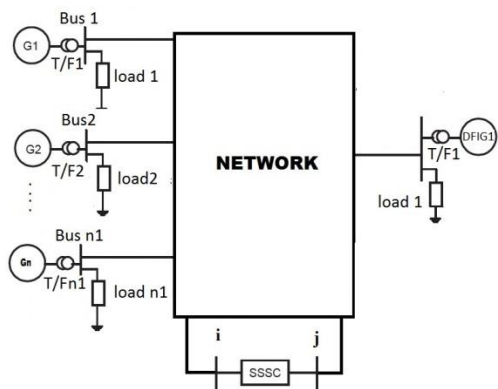
با رشد منابع تولید و مصرف انرژی و ظرفیت محدود خطوط انتقال به دلیل مسائل حرارتی، عایقی و پایداری شبکه، نیاز به استفاده از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال موجود، مسئله مهمی است [۱].

با توجه به رشد ادوات الکترونیک قدرت، یکی از راه‌های افزایش ظرفیت خطوط انتقال، استفاده از سیستم‌های انعطاف‌پذیر انتقال AC (FACTS) در شبکه‌های قدرت است [۲، ۳].

موضوع پایداری سیستم‌های قدرت بعد از رفع خطا اهمیت بالایی دارد. موضوع استفاده از DFIG و عناصر FACTS موجود در سیستم قدرت به منظور ارتقای پایداری سیستم از موضوعات مهم است. با اعمال کنترل مناسب بر DFIG و عناصر FACTS و تحریک ژنراتورهای سنکرون در شبکه قدرت، پایداری سیستم بهبود می‌یابد. سیستم قدرتی مناسب است که در مقابل خطاها و عوامل ناخواسته مقاوم باشد و پایداری سیستم را تأمین کند. انواع خطاها نظیر اتصال کوتاه، رشد بار، کمبود تولید و عوامل متعدد دیگر از تهدیدکننده‌های جدی امنیت سیستم و برهم‌زننده پایداری‌اند. در بیشتر مطالعات با استفاده از پایدارسازهای خطی، به طور مثال، بر پایه LMI در شرایط کاری مشخص سعی می‌شود پایداری برآورده شود. معمولاً برای بهبود پایداری در سیستم‌های قدرت از پایدارسازهای سنتی نظیر PSS استفاده می‌کنند که این روش‌ها براساس کنترل‌کننده‌های محلی استوار بوده‌اند و ممکن است برای بقیه ماشین‌ها مشکلاتی نظیر فروپاشی رزونانسی به وجود آورد. با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت سیستم‌هایی به شدت غیرخطی، پیچیده و به هم پیوسته‌اند که به طور دائم برای پاسخ به تقاضای بیشتر مصرف تحت فشارند و عملاً نقطه‌کار در این سیستم‌ها تغییر می‌کند، اعمال این روش‌های خطی با حاشیه امنیت پایین، پایداری سیستم را تأمین نمی‌کنند [۴-۸].

استفاده از پایدارسازهایی بر مبنای روش‌های غیرخطی

قدرت ورودی مکانیکی ژنراتورها ثابت است و از مقاومت استاتور ژنراتورها نیز صرف نظر شده است. کل بار مصرفی در هر باس  $i$  به صورت  $Y_i = G_i - jB_i$  مدل شده است [۱۶].



شکل (۱): نمای کلی شبکه قدرت مطالعه شده

### ۲-۱- مدل ژنراتورهای سنکرون:

مدل ژنراتورهای سنکرون به صورت یک مدل مرتبه سوم مطابق معادلات (۱) بیان می شود. در این مدل،  $u_{fi}$  ورودی کنترل سیستم تحریک ژنراتور در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$(1) \begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - \dot{E}_{qi} I_{qi}] \\ \dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{doi}} (u_{fi} - \dot{E}_{qi} - (x_{di} - \dot{x}_{di}) I_{di}) \end{cases}$$

### ۲-۲- مدل DFIG:

در شکل (۲) یک DFIG متصل به شبکه قدرت نشان داده شده است. DFIG دارای دو مبدل الکترونیک قدرت RSC و GSC است. با توجه به آنکه مسئله پایداری سیستم قدرت با استفاده از طراحی کنترل مناسب روی DFIG مطرح است و با توجه به اینکه در این مسئله مبدل RSC نقش اصلی را دارد، مدل ارائه شده بر مبنای کنترل ورودی روی این مبدل است. در این مدل، فرض بر صفر بودن مقاومت استاتور است. برای سادگی بدون از دست رفتن رفتار واقعی سیستم مطابق مرجع [۱۸] مدل مرتبه سه شبیه به ژنراتور سنکرون به صورت معادلات (۲)

سنکرون و یک مدل مرتبه سه برای DFIG معرفی و پس از آن، مدل تزریقی توان برای SSSC ارائه شد. بعد از مدل سازی، کنترل کننده پسگام چندورودی طراحی می شود و در ادامه، رویکرد مد لغزشی طراحی می شود. در انتها نتایج شبیه سازی در مقایسه با روش های مرسوم ارائه می شوند.

جدول (۱): معرفی هر یک از نمادهای به کاررفته در روابط

نام متغییر	علامت
زاویه روتور ژنراتور $i$ ام	$\delta_i$
سرعت زاویه ای ژنراتور $i$ ام	$\omega_i$
ولتاژ داخلی در راستای محور $q$ در ژنراتور $i$ ام	$\dot{E}_{qi}$
ولتاژ داخلی معادل برای ژنراتور DFIG $i$ ام	$\dot{E}_i$
جریان در راستای محور $d$ در ژنراتور $i$ ام	$I_{di}$
جریان در راستای محور $q$ در ژنراتور $i$ ام	$I_{qi}$
ولتاژ تحریک ژنراتور $i$ ام	$u_{fi}$
توان مکانیکی ورودی ژنراتور $i$ ام	$P_{mi}$
ممان اینرسی ژنراتور $i$ ام	$M_i$
ورودی کنترلی مربوط به DFIG	$u_d$
زاویه رتور در حالت ماندگار برای ژنراتور $i$ ام	$\delta_{oi}$
سرعت زاویه ای رتور در حالت ماندگار برای ژنراتور $i$ ام	$\omega_{oi}$
دامنه ولتاژ ترمینال ژنراتور $i$ ام	$V_i$
فاز ولتاژ ترمینال ژنراتور $i$ ام	$\theta_i$
ثابت زمانی سیستم تحریک ژنراتور $i$ ام	$T_{doi}$
راکتانس حالت ماندگار در راستای محور $d$ برای ژنراتور $i$ ام	$x_{di}$
راکتانس حالت گذرا در راستای محور $d$ برای ژنراتور $i$ ام	$\dot{x}_{di}$
راکتانس حالت ماندگار در راستای محور $q$ برای ژنراتور $i$ ام	$x_{qi}$
بردار راکتانس معادل در حالت ماندگار	$X$
بردار راکتانس معادل در حالت گذرا	$\dot{X}$

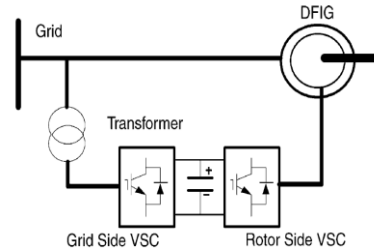
### ۲- مدل سازی سیستم قدرت

در این بخش، ابتدا مدل استفاده شده برای ماشین سنکرون و سپس مدل به کاررفته برای DFIG بیان و در ادامه، مدل استفاده شده برای SSSC معرفی و در نهایت، مدل کلی سیستم قدرت شامل DFIG و SSSC ارائه می شود. در شکل (۱) شمای کلی از شبکه قدرت مطالعه شده نشان داده شد، که شامل  $n1$  ژنراتور سنکرون، ژنراتور القایی سیستم دو سو تغذیه (DFIG) و SSSC است. خطوط انتقال بدون تلفات در نظر گرفته و با ماتریس ادمیتانس  $\bar{Y}_{ij} = jB_{ij}$  مدل می شوند. در این سیستم قدرت، فرض بر این است که

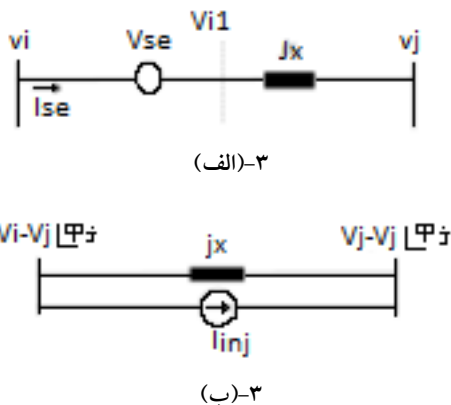
بیان می شود.

۲-۳- مدل SSSC:

برای مدل سازی عنصر SSSC در شبکه قدرت فرض می شود هر عنصر SSSC در شبکه بین باس  $i$  و باس  $j$  قرار دارد (شکل ۳). مدل ارائه شده برای SSSC یک مبدل سری است. این مبدل توان راکتیو به شاخه سری تزریق می کند و برای تثبیت ولتاژ باس های سیستم قدرت و همچنین، مشارکت در بهبود پایداری استفاده می شود [۱۹].



شکل (۲): شمای کلی DFIG متصل به شبکه

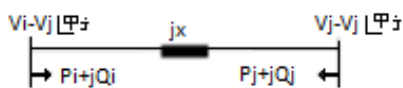


شکل (۳): الف) SSSC بین باس های  $i$  و  $j$ ، ب) معادل SSSC

از SSSC با انتخاب مناسب منبع ولتاژ سری برای بهبود پایداری استفاده می شود؛ بنابراین، این ولتاژ کنترل پذیر  $V_{se}$  مبدل به صورت (۴) بیان می شود.

$$\begin{cases} \bar{I}_{inj} = -jB_{ij}V_{se} \\ v_{se} = V_{se}e^{j\Phi_{se}} \\ B_{ij} = \frac{1}{x_{sij}} \end{cases} \quad (4)$$

در شکل (۴) مدل معادل SSSC تزریقی جایگزین شده است.



شکل (۴): مدل معادل تزریقی SSSC در شبکه قدرت

در اینجا تعاریف توان های تزریقی معادل  $P_{sj}, P_{si}, Q_{sj}$  و  $Q_{si}$  برای باس های  $i$  و  $j$  به صورت (۵) هستند.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \frac{1}{\dot{E}_{qi}T_{oi}}(-T_{oi}(\omega_i - \omega_0)\dot{E}_{qi} \\ - \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{E}_{qi}T_{oi}}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + T_{oi}\omega_0 V_{ri} \cos(\delta_i - \Phi_{ri})) \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{2H_i}[P_{mi} \frac{\omega_s}{\omega_i} - B_{ij}\dot{E}_{qi}V_i \sin(\delta_i - \theta_i)] \\ \dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{oi}}(-\frac{X_i}{\dot{X}_i}\dot{E}_{qi} + \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{X}_i}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + \\ T_{oi}\omega_0 V_{ri} \cos(\delta_i - \Phi_{ri})) \end{cases} \quad (2)$$

در این روابط  $V_i$  و  $\theta_i$  به ترتیب دامنه ولتاژ و زاویه فاز باس ها است.  $B_{ij}$  راکتانس ماتریس ادمیتانس سیستم بین DFIG و باس متصل شده به آن است.  $\dot{E}_{qi}$  ولتاژ داخلی ژنراتور  $i$  ام است،  $V_{ri}$  و  $\Phi_{ri}$  نیز به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ اعمال شده به روتور DFIG در مختصات قطبی اند.

با تعاریف  $u_{d1i} = V_{ri} \cos(\Phi_{ri})$  و  $u_{d2i} = V_{ri} \sin(\Phi_{ri})$  می شود. در اینجا  $u_{d2i}$  و  $u_{d1i}$  ورودی های کنترلی DFIG هستند که با اعمال کنترل به روش های غیرخطی روی آن، پایداری را بهبود می بخشند.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \frac{1}{\dot{E}_{qi}T_{oi}}[-T_{oi}(\omega_i - \omega_0)\dot{E}_{qi} - \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{E}_{qi}T_{oi}}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\ + T_{oi}\omega_0(u_{d1i} \cos(\delta_i) + u_{d2i} \sin(\delta_i))] \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{2H_i}[P_{mi} \frac{\omega_s}{\omega_i} - B_i \dot{E}_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)] \\ \dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{oi}}[-\frac{X_i}{\dot{X}_i}\dot{E}_{qi} + \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{X}_i}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \\ + T_{oi}\omega_0(u_{d1i} \sin(\delta_i) + u_{d2i} \cos(\delta_i))] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{Li} + \sum_{j=1}^N B_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) - \\ B_{ij} V_{se} V_i \sin(\theta_i - \Phi_{se}) = 0 \\ -Q_{Li} + \sum_{j=1}^N B_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \\ + B_{ij} V_{se} V_i \cos(\theta_i - \Phi_{se}) = 0 \end{cases} \quad (۸)$$

سپس معادلات (۹) با مشتق‌گیری از روابط (۸) و جداسازی متغیرها به دست می‌آیند.

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,2(n+2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{2N,1} & \dots & a_{2N,2(n+2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_{n+2} \\ \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \dots & b_{1,2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{2N,1} & \dots & b_{2N,2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{q1} \\ \dot{E}_{q2} \\ \vdots \\ \dot{E}_{qn} \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ g_{2N,1} & g_{2N,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_{s1} \\ \dot{u}_{s2} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

فرم ماتریسی روابط (۹) به صورت (۱۰) بازنویسی می‌شود.

$$[A][\dot{v}] = -[B] \begin{bmatrix} \dot{E}_q \\ \delta \end{bmatrix} - [G]\dot{U}_s \quad (۱۰)$$

که در این رابطه:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= [\dot{V}_1 \dots \dot{V}_{n+2} \quad \dot{\theta}_1 \dots \dot{\theta}_{n+2}]^T, \\ \dot{E}_q &= [\dot{E}_{q1} \dots \dot{E}_{qn}]^T, \\ \delta &= [\delta_1 \dots \delta_n]^T, \\ \dot{U}_s &= \begin{bmatrix} \dot{u}_{s1} \\ \dot{u}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = r \end{aligned}$$

با توجه به آنکه  $r_2$  و  $r_1$  به هم وابسته‌اند، پس عملاً یک ورودی کنترلی برای SSSC در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۰) و تعاریف  $\dot{E}_{qi}$  و  $\delta_n$  در روابط (۱) و (۳)، روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} h_i = \frac{1}{T_{0i}} (-\dot{E}_{qi} - (X - \dot{X})I_{di}) \\ \dot{E}_{qi} = h_i + \frac{1}{T_{0i}} u_{fi} \end{cases} \quad (۱۱)$$

$$\begin{cases} P_{si} = -B_{ij} V_{sek} V_i \sin(\theta_i - \Phi_{sek}) \\ Q_{si} = B_{ij} V_{sek} V_i \cos(\theta_i - \Phi_{sek}) \\ P_{sj} = B_{ij} V_{sek} V_j \sin(\theta_j - \Phi_{sek}) \\ Q_{sj} = -B_{ij} V_{sek} V_j \cos(\theta_j - \Phi_{sek}) \end{cases} \quad (۵)$$

با توجه به اینکه SSSC، در این مطالعه فقط قابلیت تولید و مصرف توان راکتیو را دارد، باید مقدار توان اکتیو تولیدی یا مصرفی آن برابر با صفر باشد. با در نظر گرفتن این موضوع و با فرض آنکه مقاومت سری خط انتقالی که SSSC بر روی آن قرار دارد، صفر در نظر گرفته شود، زاویه ولتاژ SSSC به صورت (۶) بیان می‌شود.

$$\Phi_{sek} = \tan^{-1} \left( \frac{V_j \sin(\theta_j) - V_i \sin(\theta_i)}{-V_j \cos(\theta_j) + V_i \cos(\theta_i)} \right) \quad (۶)$$

## ۲-۴- مدل کلی سیستم قدرت:

برای رسیدن به مدل کلی سیستم قدرت، معادلات جبری تعادل توان همه باس‌های متصل به ژنراتورهای سنکرون و متصل به SSSC و DFIG سیستم قدرت به صورت (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} P_{Li} + \sum_{j=1}^N B_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) = 0 \\ -Q_{Li} + \sum_{j=1}^N B_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) = 0 \end{cases} \quad (۷)$$

در این روابط N تعداد کل باس‌ها شامل ژنراتور سنکرون و DFIG و باس‌های متصل به SSSC است. در این بررسی، n برابر با مجموع تعداد ژنراتورهای سنکرون و DFIG و عناصر ماتریس ادمیتانس کاهش‌یافته شبکه‌اند. با توجه به روابط توان‌های تزریقی SSSC طبق روابط (۵) و با در نظر گرفتن  $u_{s1} = V_{sek} \cos(\Phi_{se})$  و  $u_{s2} = V_{se} \sin(\Phi_{se})$  و بسط مثلثاتی روابط (۷)، معادلات جبری تعادل توان در باس‌های i و j با اضافه کردن توان‌های تزریقی SSSC به صورت روابط (۸) بیان می‌شوند:

$$\delta_i = \frac{1}{\dot{E}_i T_{0i}} [-T_{0i}(\omega_i - \omega_0) \dot{E}_i - \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{E}_{qi} T_{0i}} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + T_{0i} \omega_0 u_{di} \cos(\delta_i)] \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i &= \frac{\omega_0}{2H_i} [P_{mi} \frac{\omega_s}{\omega_i} - B_i \dot{E}_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)] \\ \dot{E}_i &= \frac{1}{T_{0i}} [-\frac{X_i}{\dot{X}_i} \dot{E}_i + \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{X}_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + T_{0i} \omega_0 u_{di} \sin(\delta_i)] \\ \dot{V}_i &= \sum_{j=1}^{n+p} c_{ij} H_j + \sum_{j=1}^{n+p} d_{ij} u_{fj} + \sum_{j=1}^{n+p} k_{ij} r \\ \dot{\theta}_i &= \sum_{j=1}^{n+p} c_{i+n+2,j} H_j + \sum_{j=1}^{n+p} d_{i+n+2,j} u_{fj} + \sum_{j=1}^{n+p} k_{i+n+2,j} r \end{aligned} \quad (18)$$

### ۳- طراحی کنترل کننده غیرخطی:

در ابتدا روش پسگام تک ورودی، معرفی و در ادامه، به چند ورودی تعمیم داده می شود.

روش پسگام برای سیستم های غیرخطی به شدت فیدبکی به صورت (۱۹) اجرا می شود.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = F(x_1, x_2, \dots, x_n) + G(x_1, x_2, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (19)$$

در این سیستم  $x_i \in R$  متغیرهای حالت  $i=1,2,\dots,n$  بردار پارامترهای نامعین تعریف می شود.  $u \in R^p$  ورودی کنترل در نظر گرفته می شود. با شرایط در نظر گرفته شده ورودی کنترل با فرم (۲۰) به دست می آید [۲۰].

$$u = \alpha_n = -z_{n-1} - c_n z_n + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{d\alpha_{n-1}}{dx_j} x_{j+1} + \beta_n \quad (20)$$

روش بیان شده در مرجع [۲۰] برای یک سیستم تک ورودی کاربرد دارد. در اینجا با توسعه روش به کاررفته برای یک سیستم چندورودی یک کنترل کننده پسگام چندورودی برای سیستم قدرت با مدل ژنراتور سنکرون مرتبه ۳ طراحی می شود.

با توجه به مدل به دست آمده در (۱۶-۱۸) تعداد ورودی های کنترل پذیر سیستم برابر با  $n$  است. به منظور دستیابی به یک مدل بازگشتی، ابتدا متغیرهای حالت

$$[A][\dot{v}] = -[B] \begin{bmatrix} h_i \\ \delta \end{bmatrix} - [B]U_f - [G]r \quad (12)$$

$$\dot{B} = [B] \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{01}} \\ \vdots \\ \frac{1}{T_{0n}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

که در (۱۲):

$U_f = [u_{f1} \dots u_{fn1} \ u_{d1} \ u_{d2}]^T$  مربوط به تحریک ژنراتورهای سنکرون و  $r$  ورودی قابل کنترل SSSC موجود در سیستم قدرت است. با حل معادله ماتریسی (۱۲) رابطه زیر به دست می آید:

$$[\dot{v}] = [C] \begin{bmatrix} h_i \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix} + [D]U_f + [K]r \quad (13)$$

تعاریف ماتریس های  $C, D$  و  $K$  به صورت (۱۴) است:

$$[C] = -[A]^{-1}[B], [D] = -[A]^{-1}[\dot{B}], [K] = -[A]^{-1}[G] \quad (14)$$

که در این معادلات، ماتریس های  $C, D, K$  و  $H$  به صورت زیر بیان می شوند:

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \dots & c_{1,2(n+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{2N,1} & \dots & c_{2N,2(n+1)} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \dots & d_{1,n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{2N,1} & \dots & d_{2N,n+1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{2N,1} & \dots & k_{2N,2} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_i \\ \omega \end{bmatrix}$$

به این ترتیب، معادلات حالت شبکه قدرت با وجود DFIG و SSSC به صورت معادلات (۱۶) بیان می شوند که در این معادلات، بخش اول مربوط به ژنراتورهای سنکرون، بخش دوم مربوط به DFIG و بخش سوم مربوط به ولتاژ بآس های شبکه است.

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i - \omega_{0i} \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} [P_{mi} - \frac{\dot{E}_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{\dot{X}_{di}} - \frac{V_i^2 \sin 2(\delta_i - \theta_i)}{2X_{qi} \dot{X}_{di}}] \\ \dot{E}_{qi} &= \frac{1}{T_{doi}} (u_{fi} - \frac{\dot{E}_{qi} X_{di}}{\dot{X}_{di}} - \frac{V_i (X_{di} - \dot{X}_{di}) \cos(\delta_i - \theta_i)}{\dot{X}_{di}}) \end{aligned} \quad (16)$$

جدیدی به صورت (۲۱) تعریف می شود.

$$\begin{aligned} x_{1i} &= \delta_i - \delta_{i0}, & x_{2i} &= \omega_i - \omega_{0i} \\ x_{3i} &= \dot{E}_{qi} I_{qi} \end{aligned} \quad (21)$$

با تعریف متغیرهای رابطه (۲۱)، مشتق گیری و استفاده

از رابطه (۱۶-۱۸) معادلات حالت جدید به صورت (۲۲) به دست می آید

$$\begin{cases} \dot{x}_{1i} = x_{2i} \\ \dot{x}_{2i} = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - x_{3i}] \\ \dot{x}_{3i} = f_{Ti} + \sum_{j=1}^{n+2} g_{Tij} u_{fj} + \sum_{j=1}^{n+2} L_{ij} r \end{cases} \quad (22)$$

فرم ماتریسی معادلات (۲۲) به صورت (۲۳) است

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = M_{inv} [P_m - X_3] \\ \dot{X}_3 = F_T + U \end{cases} \quad (23)$$

که در این روابط

$$U = G_T U_f + Lr$$

$U$  بردار ورودی های کنترلی است.

حال یک تابع لیپانف به صورت زیر تعریف می شود.

$$V_L = X_1^T X_1 + Z_1^T Z_1 + Z_2^T Z_2$$

پس از مشتق گیری و جایگذاری از (۲۳) و (۲۶) مشتق

تابع لیپانف به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= X_1^T \dot{X}_1 + Z_1^T K_T \dot{Z}_1 + Z_2^T K_S \dot{Z}_2 \\ \dot{V}_L &= -X_1^T K_D X_1 + Z_1^T (X_1 + M_{inv} [P_m - X_{3s}] + \\ &K_D X_2) + Z_2^T (F_T + U - M_{inv} Z_1 - \dot{X}_{3s}) \end{aligned}$$

برای منفی معین شدن مشتق تابع لیپانف و در نتیجه،

پایداری سیستم باید شرایط زیر برقرار شوند.

$$X_1 + M_{inv} [P_m - X_{3s}] + K_D X_2 = -K_T Z_1 \quad (27)$$

$$(F_T + U - M_{inv} Z_1 - \dot{X}_{3s}) = -K_S Z_2 \quad (28)$$

با توجه به (۲۷) نوشته می شود:

$$X_{3s} = M_{inv}^{-1} (K_T Z_1 + X_1 + M_{inv} P_m + K_D X_2) \quad (29)$$

با در نظر گرفتن شرایط بیان شده، مشتق تابع لیپانف

منفی، معین و در نتیجه، پایداری سیستم تضمین می شود

[۲۱].

$$\dot{V}_L = -X_1^T K_D X_1 - Z_1^T K_T Z_1 - Z_2^T K_S Z_2$$

و در نهایت، ورودی کنترلی براساس رابطه (۲۸)

به صورت زیر بیان می شود:

$$U = -K_S Z_2 + M_{inv} Z_1 - F_T + \dot{X}_{3s} \quad (30)$$

با توجه به رابطه (۳۰) قانون کنترلی به دست آمده شامل

یک ترم مشتقی است. این ترم باعث ایجاد نویز و بی دقتی در

قانون کنترل می شود؛ به همین دلیل، برای رفع این مشکل از

یک مشاهده گر حالت مد لغزشی برای  $\dot{X}_{3s}$  استفاده شده

است و در نتیجه، عامل مشتق گیر حذف می شود. با توجه به

اینکه  $\dot{X}_{3s}$  یک بردار  $n$  عضوی است، برای هر عضو تعریف

می شود:

$$\gamma_{1i} = x_{3si}, \gamma_{2i} = \dot{x}_{3si}$$

$$\dot{\gamma}_{1i} = \dot{x}_{3si} = \gamma_{2i}$$

با توجه به اینکه سیگنال  $x_{3si}$  قابل اندازه گیری است و

شرایط لازم برای طراحی مشاهده گر مد لغزشی مرتبه ۲ را

دارد:

$$\begin{cases} Z_1 = [z_{11} \ z_{12} \ \dots \ z_{1n}]^T \\ Z_2 = [z_{21} \ z_{22} \ \dots \ z_{2n}]^T \\ X_1 = [x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{1n}]^T \\ X_2 = [x_{21} \ x_{22} \ \dots \ x_{2n}]^T \\ X_3 = [x_{31} \ x_{32} \ \dots \ x_{3n}]^T \\ X_{3s} = [x_{3s1} \ x_{3s2} \ \dots \ x_{3sn}]^T \end{cases} \quad (24)$$

با توجه به اینکه معادلات به دست آمده به فرم بازگشتی

است، از روش پسگام چندورودی برای طراحی کنترل کننده

استفاده می شود. براساس روش پسگام، متغیرهای زیر

تعریف می شوند.

$$\begin{cases} Z_1 = X_2 + K_D X_1 \\ Z_2 = X_3 - X_{3s} \end{cases} \quad (25)$$

و سپس دینامیک این متغیرها مطابق رابطه زیر بیان

می شود.

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = M_{inv} [P_m - X_3] + K_D (Z_1 - K_D X_1) \\ \dot{Z}_2 = F_T + U - \dot{X}_{3s} \end{cases} \quad (26)$$



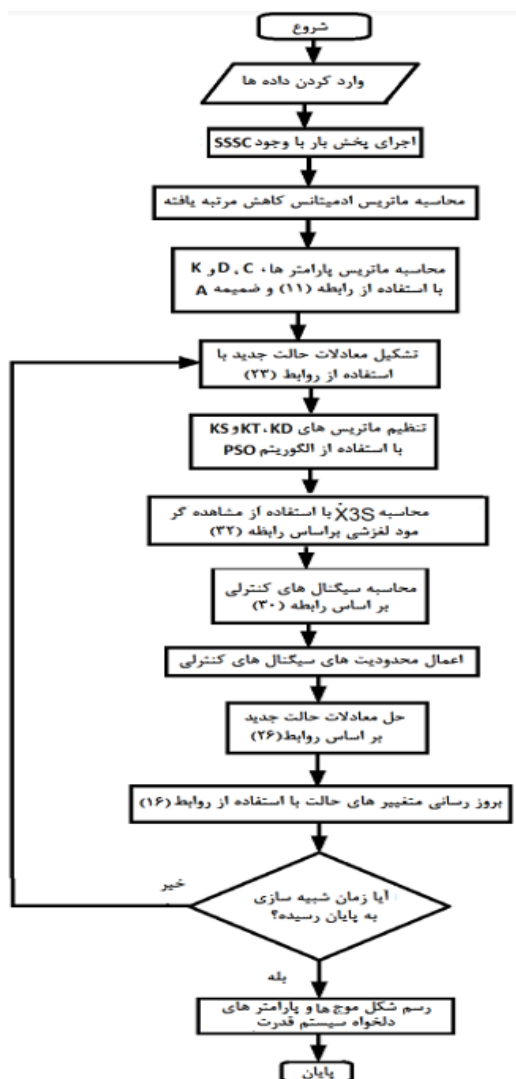
بهبود پایداری سیستم قدرت دارای DFIG در حضور SSSC به روش غیرخطی

سازی در پیوست ب آورده شده است.

$$\begin{cases} \dot{\hat{\gamma}}_{1i} = \hat{\gamma}_{2i} + a_{1\gamma} \\ \dot{\hat{\gamma}}_{2i} = a_{2\gamma} \end{cases} \quad (31)$$

#### ۴-۱- الگوریتم روش پیشنهادی برای بهبود پایداری سیستم قدرت شامل DFIG و SSSC

روند نمای ساختار کلی برنامه حل مسئله پایداری سیستم قدرت شامل SSSC و DFIG با روش کنترل پسگام چندورودی با رؤیت‌گر مد لغزشی در شکل (۶) آمده است.



شکل (۶): روند نمای شبیه سازی سیستم قدرت شامل SSSC و

DFIG با روش کنترل پسگام چندورودی با رؤیت‌گر مد

لغزشی

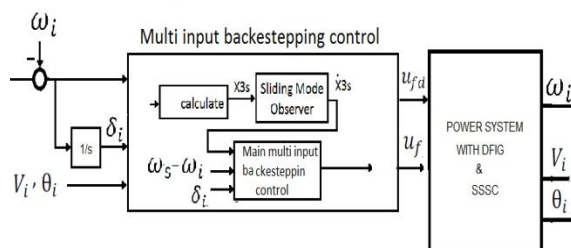
که در این روابط

$$a_{1\gamma} = -\beta_{\gamma}|\hat{\gamma}_{1i} - \gamma_{1i}|^{\frac{1}{2}}\text{sign}(\hat{\gamma}_{1i} - \gamma_{1i})$$

$$\begin{aligned} -K_{\gamma}(\hat{\gamma}_{1i} - \gamma_{1i}) \\ a_{2\gamma} = -\alpha_{\gamma}\text{sign}(\hat{\gamma}_{1i} - \gamma_{1i}) \end{aligned} \quad (32)$$

مراحل کامل اثبات پایداری در [۲۲] آورده شده است.

برای درک بهتر نحوه عملکرد سیستم و کنترل کننده طراحی شده به همراه مشاهده گر حالت مد لغزشی در شکل (۵) یک دیاگرام کلی نشان داده شده است.



شکل (۵): دیاگرام سیستم کنترل پسگام به همراه مشاهده گر حالت مد لغزشی برای سیستم قدرت شامل DFIG و SSSC

#### ۴-۲- بهینه سازی ماتریس های $K_D$ , $K_T$ و $K_S$ با استفاده از الگوریتم هوشمند PSO:

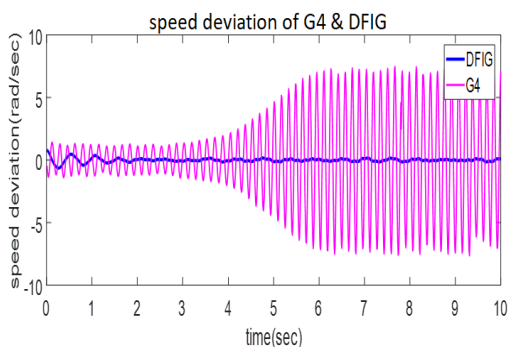
در طراحی کنترل کننده این بخش برای به دست آوردن بهترین جواب به منظور بهبود پایداری ماتریس های بهره با استفاده از الگوریتم بهینه سازی هوشمند PSO استخراج می شود. تابع هدف در نظر گرفته شده برای این قسمت به صورت (۳۳) است. با مینیمم سازی تابع هدف پیشنهاد شده با قیود حاکم برای ورودی کنترلی مقادیر ماتریس های بهره  $K_D$ ,  $K_T$  و  $K_S$  تعیین می شوند [۲۳].

$$J = \sum_{j=1}^n (\delta_i - \delta_{i0})^2 + \tau \sum_{j=1}^n (\omega_i - \omega_{i0})^2 \quad (33)$$

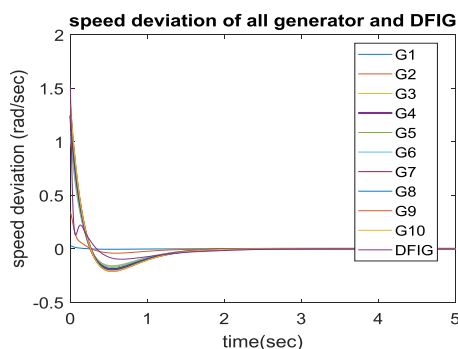
در رابطه (۳۳)  $\tau$  یک ضریب وزنی است که به صورت تجربی تعیین می شود. مقدار ضرایب به دست آمده در بهینه

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

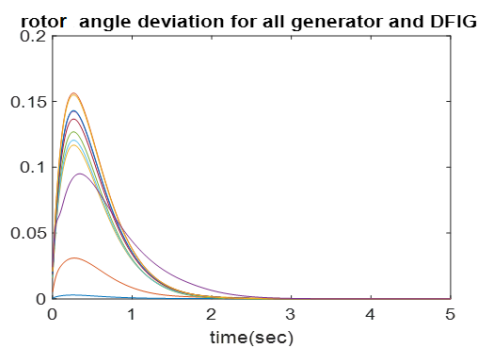
شکل‌های (b-۸) و (c-8) تغییرات زاویه داخلی و سرعت ماشین‌ها بعد از رفع خطا در این حالت نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تمامی ماشین‌ها و DFIG به نقطه تعادل رسیده‌اند.



(a)



(b)

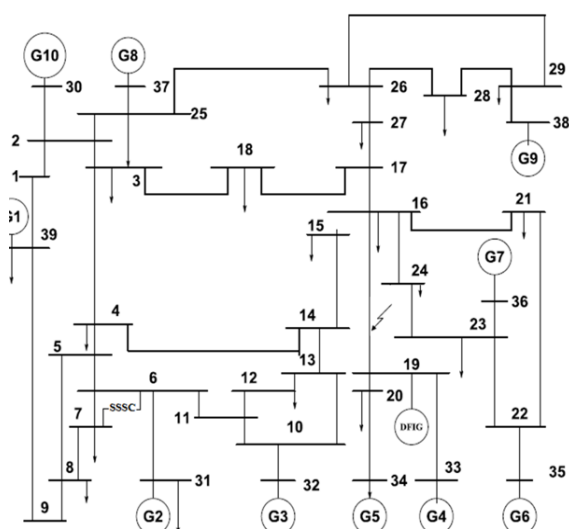


(c)

شکل (۸): (a) تغییر سرعت ژنراتور ۴ و DFIG در حالت بدون کنترل (b) تغییرات سرعت زاویه‌ای همه ماشین‌ها - (c) تغییرات زاویه رتور همه ماشین‌ها

برای درک بهتر دیگرام فاز میرایی، تغییرات سرعت و زاویه رتور در شکل‌های (۹) و (۱۰) مربوط به ژنراتور شماره ۴ و DFIG نشان داده شده‌اند. در هر دو نمودار

برای اثبات کارایی کنترل‌کننده غیرخطی طراحی شده از شبکه ۳۹ باسه استاندارد NEW ENGLAND نشان داده شده در شکل (۷) استفاده شده است. این شبکه شامل ۱۰ ماشین سنکرون، DFIG در ب‌اس شماره ۱۹ و SSSC بین ب‌اس‌های شماره ۶ و ۷ است. انتخاب محل SSSC با توجه به نتایج پخش بار برای بهبود پروفیل ولتاژ ب‌اس‌ها صورت گرفته است. همچنین، باعث بهبود پایداری ولتاژ می‌شود. در نظر گرفتن DFIG متصل به ب‌اس ۱۹ با توجه به مطالعات انجام شده در مراجع [4] صورت پذیرفته است. مشخصات کامل سیستم قدرت تحت مطالعه در پیوست الف مطابق مرجع [۲۴] آمده است.

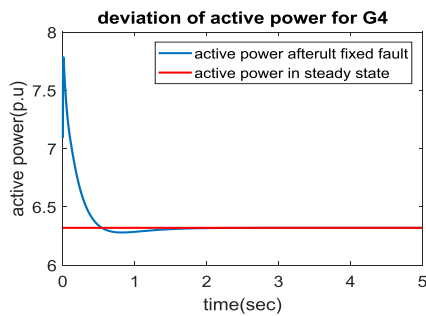


شکل (۷): شبکه ۳۹ باسه استاندارد NEW ENGLAND به همراه DFIG در ب‌اس شماره ۱۹ و SSSC بین ب‌اس‌های شماره ۱۶ و ۱۹

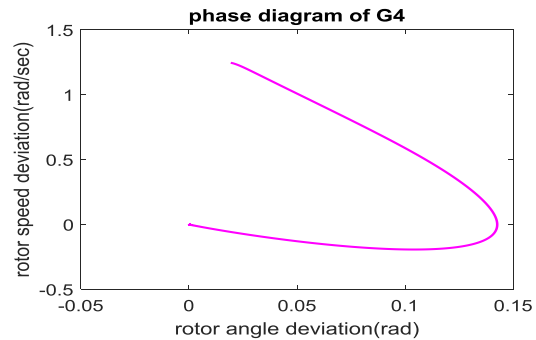
یک اتصال کوتاه سه‌فاز در شبکه ۳۹ باسه در نزدیکی ژنراتور ۴ به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده است.

در ابتدا سیستم فاقد هر گونه کنترلی است و برای نمونه، رفتار تغییرات سرعت ژنراتور G4 و DFIG در شکل (8-a) آمده است. همان‌طور که مشخص است سیستم قدرت دارای ناپایداری است. در مطالعه اول فقط ورودی کنترلی DFIG و ژنراتورهای سنکرون برای بهبود پایداری با استفاده از روش پسگام چندورودی تعیین شده است. در

مشاهده می شود با سرعت پذیرفتنی از نقطه شروع بعد از رفع خطا به سمت صفر حرکت می کنند و به نقطه صفر می رسند.

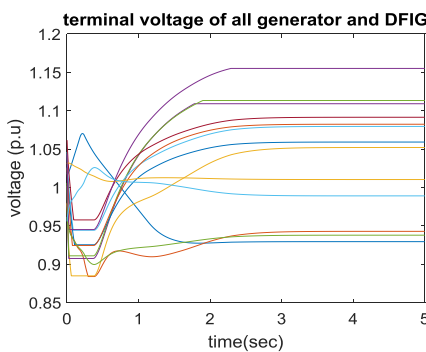


شکل (۱۲): تغییرات توان اکتیو در ژنراتور G4 بعد از رفع خطا

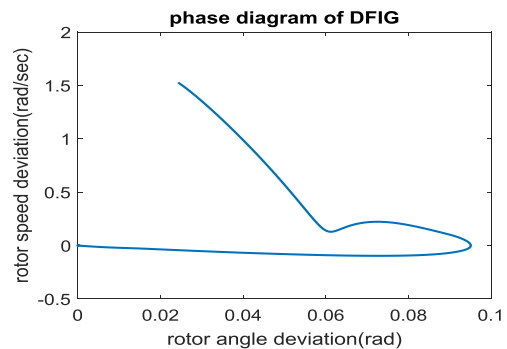


شکل (۹): دیاگرام فاز ژنراتور شماره ۴

در شکل (۱۳) نمودار ولتاژ ترمینال ژنراتورهای سیستم و DFIG نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می شود ولتاژ ترمینال ها پس از اعوجاج در زمان خطا به مقدار مناسب قبل از وقوع خطا می رسند.



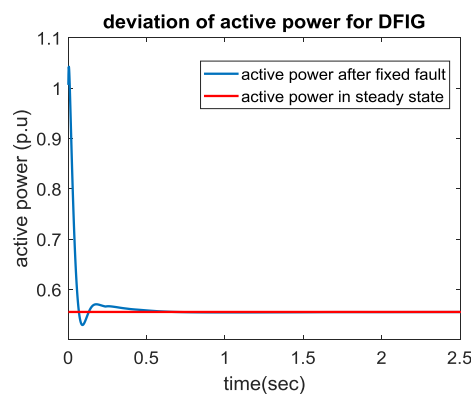
شکل (۱۳) - ولتاژ ترمینال همه ژنراتورهای سنکرون و DFIG بعد از رفع خطا



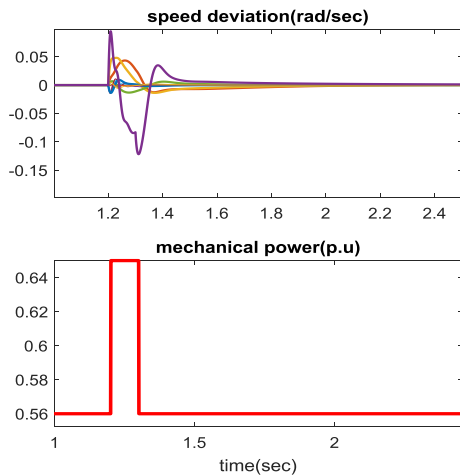
شکل (۱۰): دیاگرام فاز مربوط به و DFIG

در شکل های (۱۱) و (۱۲) یکی دیگر از پارامترهای مهم در پایداری، یعنی تغییرات توان اکتیو برای ژنراتورهای شماره (۴) و DFIG نشان داده شده است. بر اساس این شکل ها مشاهده می شود به طور مثال، DFIG بعد از رفع خطا با یک فراجهش در حدود ۰/۲۵ پریونیت و در زمانی در حدود ۰/۴ ثانیه به مقدار مرجع خود همگرا می شود.

در شکل (۱۴) سیگنال های کنترلی مربوط به همه ژنراتورهای سنکرون نشان داده شده اند که با استفاده از کنترل کننده پسگام چندورودی با مشاهده گر مد لغزشی تولید شده اند. ملاحظه می شود با توجه به محدودیت در نظر گرفته شده روی ورودی ها دامنه تغییرات سیگنال های کنترلی از ۲ پریونیت تجاوز نمی کند و سیستم با سرعت خوبی بعد از رفع خطا پایدار می شود.

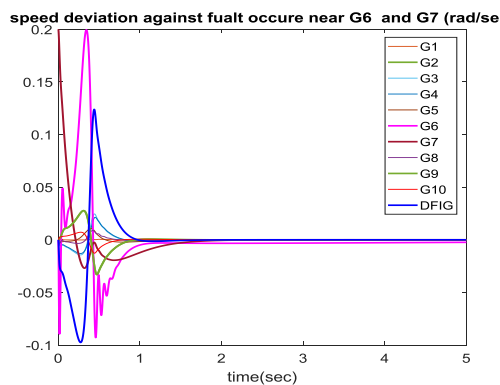


شکل (۱۱): تغییرات توان اکتیو در ژنراتور DFIG بعد از رفع خطا

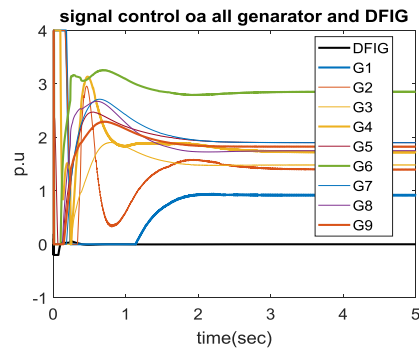


شکل (۱۶): تغییرات سرعت ژنراتورهای سنکرون و DFIG در برابر تغییرات ۱۰ درصدی بار مکانیکی در ژنراتور DFIG

در شکل (۱۷) برای نشان دادن این موضوع که عملکرد کنترل‌کننده به محل اختلال بستگی ندارد. یک خطای اتصال کوتاه در نزدیکی ژنراتور سنکرون G6 و G7 رخ داده است. نمودار تغییرات سرعت ماشین‌ها بعد از رفع این خطا نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود تغییرات سرعت همه ژنراتورها بعد از حدود ۲ ثانیه پایدار می‌شود.

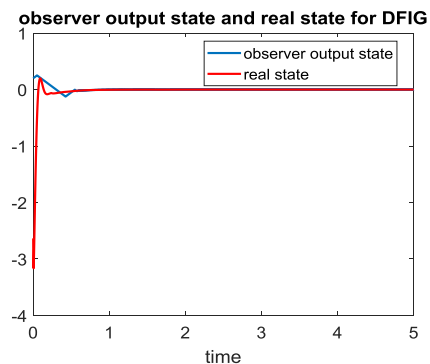


شکل (۱۷): تغییرات سرعت ژنراتورهای سنکرون و DFIG



شکل (۱۴): سیگنال کنترل همه ژنراتورهای سنکرون و DFIG

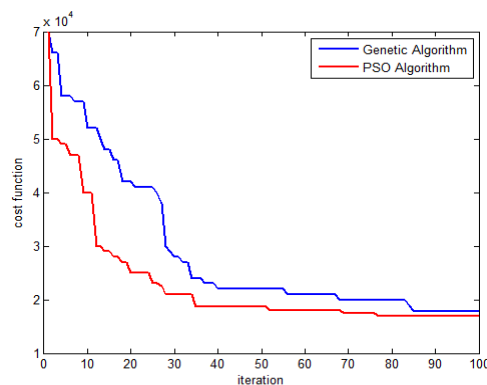
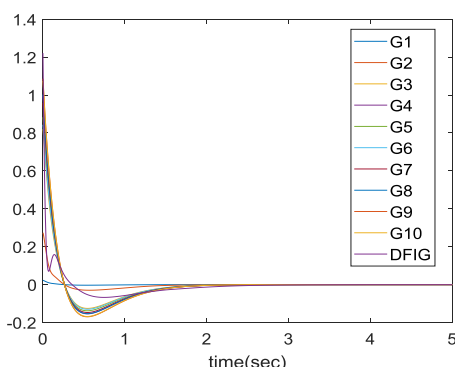
در شکل (۱۵) با توجه به صحت عملکرد مشاهده‌گر مد لغزشی و توانایی آن در رؤیت حالت مدنظر، مقایسه‌ای بین حالت واقعی موجود در سیستم و حالتی که مشاهده‌گر رؤیت کرده، نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دید به‌طور مثال، برای حالت مدنظر در DFIG خروجی مشاهده‌گر بعد از مقداری نوسان در مدت کوتاهی به مقدار واقعی خود همگرا می‌شود.



شکل (۱۵): مقایسه حالت واقعی سیستم و حالت مشاهده‌شده با مشاهده‌گر مد لغزشی

با توجه به این موضوع که توان مکانیکی در ژنراتورهای بادی تغییر می‌کند، در شبیه‌سازی، حالتی در نظر گرفته شد که میزان توان مکانیکی DFIG به اندازه ۱۰ درصد تغییر کرد. در شکل (۱۶) تغییرات سرعت ژنراتورهای سنکرون و DFIG نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود سرعت ماشین‌ها بعد از یک اعوجاج کوچک پس از حدود ۱ ثانیه پایدار می‌شود.

rotor speed deviation of generators and DFIG against 80ms short circuit fault near G4



شکل (۱۸): تابع هزینه با دو روش بهینه‌سازی هوشمند

شکل (۱۹): تغییرات سرعت ماشین‌ها در برابر خطای اتصال کوتاه ۸۰ میلی‌ثانیه در نزدیکی ژنراتور ۴

برای مقایسه کارایی کنترل‌کننده طراحی شده در این مقاله در جدول ۲ روش پیشنهادی این مقاله با مرجع ۱۰ مقایسه شده است. مشخصات پاسخ در روش پیشنهادی مقاله حاضر نسبت به روش غیرخطی اجراشده در [۱۰] رفتار بهتری دارد. باید توجه داشت این مقایسه با در نظر گرفتن شرایط مشابه به دست آمده است. در جدول ۳ روش پیشنهادی در شرایط یکسان با روش خطی ارائه شده در مرجع ۴ مقایسه شده است که براساس نتایج مندرج در جدول، کنترل‌کننده مقاله حاضر هم رفتار مطلوبی دارد.

جدول (۲): مقایسه معیارهای کنترلی در پاسخ بین کنترل‌کننده پسگام چندورودی با مشاهده‌گر مود لغزشی و روش غیرخطی [۱۰]

G4	کنترل پیشنهادی در این مقاله			کنترل غیرخطی طراحی شده در مرجع ۱۰		
	زمان صعود (sec)	زمان نشست (sec)	بالا زدگی	زمان صعود (sec)	زمان نشست (sec)	بالا زدگی
تغییرات سرعت	0.35	2.5	0.0015 p.u	0.5	5	0.005 p.u
زاویه رتور	0.35	2.7	3°	0.1	5	15°
سیگنال کنترلی	0.5	2.2	0.5 p.u	0.4	7.5	3.2 p.u

جدول (۳): مقایسه معیارهای کنترلی در پاسخ بین کنترل‌کننده پسگام چندورودی با مشاهده‌گر مود لغزشی و روش خطی در [۴]

G4	روش کنترل پیشنهادی در این مقاله با SSSC و DFIG			روش خطی کنترلی بهینه مرجع ۴		
	زمان صعود (sec)	زمان نشست (sec)	بالا زدگی	زمان صعود (sec)	زمان نشست (sec)	بالا زدگی
تغییرات سرعت	0.28	2.3	0.0025 p.u	0.2	4.5	0.015 p.u
زاویه رتور	.3	2.5	5°	0.15	4	25°
سیگنال کنترلی	0.04	2.1	1.25 p.u	-	-	-

در شکل (۱۸) مقایسه‌ای از کارایی روش بهینه‌سازی PSO نسبت به روش الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود در روش PSO هم سرعت همگرایی بیشتر است و هم مقدار مینیمم پیدا شده کمتر است.

برای نشان دادن این موضوع که کارایی کنترل‌کننده به زمان اختلال وابسته نیست، در شکل (۱۹) تغییرات سرعت ماشین‌های سیستم در برابر یک خطای اتصال کوتاه در نزدیکی ژنراتور شماره ۴ اما با زمان ۸۰ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود عملکرد سیستم کنترل نسبت به قبل تغییری نکرد.

## نتیجه گیری

تغییر نقطه کار و اختلال دارد. ماتریس‌های بهره با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند PSO در جهت بهبود پایداری استخراج می‌شوند و در نتیجه، ورودی‌های کنترلی به گونه‌ای بهینه انتخاب می‌شوند که مشتق تابع لیاپانوف، منفی‌تر و پایداری سیستم قدرت حتی در حضور برخی نامعینی‌ها و اختلالات تضمین شود. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۳ میزان بالادگی ۴۰ درصد و میزان زمان نشست ۱۵ درصد نسبت به روش غیرخطی در آخرین مطالعات انجام شده بهتر شده و علاوه بر این، نسبت به روش خطی عملکرد بهتری داشته است که این نشان از قدرت کنترل طراحی شده دارد.

در این مطالعه، یک کنترلر با توسعه روش پسگام چندورودی برای سیستم قدرت شامل DFIG و SSSC طراحی شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی حالت‌های رؤیت‌ناپذیر را با استفاده از رویکرد مد لغزشی مشاهده می‌کند و سیستم کنترل را از نیاز به مشتق‌گیر که باعث تقویت نویز و بی‌دقتی در اندازه‌گیری می‌شود، بی‌نیاز می‌سازد.

کنترل‌کننده طراحی شده با در نظر گرفتن متغیرهای مناسب برای روش پسگام و انتخاب تابع لیاپانوف مثبت معین، پیاده‌سازی و اجرا می‌شود و رفتار مقاومی در برابر

پیوست الف:

مشخصات سیستم قدرت ۳۹ با New England با ۱۰ ماشین

جدول (۴): مشخصات DFIG در شبکه قدرت

جدول (۴): مشخصات DFIG در شبکه قدرت $X_d$	$X'_d$	$X_q$	H
2.605	0.107	0.0107	4

جدول (۵): مشخصات ماشین‌های سنکرون شبکه قدرت ۳۹ با استاندارد New England

Unit No.	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl
1	5	0	0.006	0.008	0.02	0.019	7	0.7	0.03
2	30	0	0.0697	0.170	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.8	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	5 26.0	0 0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44
5	26	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.290	0.280	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42	0	0 0.031	0.008	0.1	0.069	10.2	0.0	0.0125

پیوست ب:

مقدار ماتریس‌های ضرایب بهینه‌شده در کنترل‌کننده

$$K_D = \text{Diag}[38.8 \ 35.4 \ 11.06 \ 37.14 \ 89.75 \ 54.01 \ 74.22 \ 49.45 \ 10.72 \ 48.26 \ 84.37]$$

$$K_T = \text{Diag}[36.6 \ 28.13 \ 32.36 \ 40.99 \ 72.00 \ 77.11 \ 32.06 \ 86.01 \ 78.99 \ 55.12 \ 88.51]$$

$$K_S = \text{Diag}[12.19 \ 74.77 \ 1.22 \ 24.46 \ 81.23 \ 8.83 \ 65.01 \ 24.94 \ 53.53 \ 70.61 \ 80.17]$$

[2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," IEEE Press, 2000.

[3] P. R. Sahu, P. K. Hota, S. Panda, " Power system stability enhancement by fractional order multi input SSSC based controller employing whale optimization algorithm ," Science Direct, Journal of Electrical Systems and Information Technology, Vol. 5, No 3, pp. 326-336, December 2018.

## مراجع

[1] R M Elavarasan, G. M. Shafiullah, S.k.Padmanaban, N. M. Kumar, "A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges and Policies of leading Indian States with an International Perspective ", IEEE Access, 2020.

- STATCOM controller parameters for stability enhancement of stochastic wind-penetrated power systems”, IET Generation, Transmission & Distribution, September 2020.
- [14] M. J. Morshed, A. Fekih, “A Coordinated Controller Design for DFIG-Based Multi-Machine Power Systems”, IEEE System Journal, Vol. 13, No. 3, September 2019.
- [15] A. Movahedia, A. Halvaei Niasar, G. Gharehpetian, "Designing SSSC, TCSC, and STATCOM controllers using AVURPSO, GSA, and GA for transient stability improvement of a multi-machine power and GA for transient stability improvement of a multi-machine power system with PV and wind farms system with PV and wind farms, ", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 106, pp. 455–466, 2019.
- [16] A. R. Bergen, “Power Systems Analysis,” Prentice Hall, New Jersey 2000.
- [17] P. Kundur, “Power System Stability and Control,” New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [18] K. Elkington, V. Knazkins, M. Ghandhari, "On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation", Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 9, pp. 1477–1484, September 2008.
- [19] M. Noroozian, M. Ghandehari, "Improving Power System Dynamics By Series-Connected FACTS Device,". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [20] H. K. Khalil, Nonlinear systems, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [21] E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Published by Prentice Hall, 1991.
- [22] A. Levant, “Robust exact differentiation via sliding mode technique”, Automatica, 1998.
- [23] A. Sabo, N. I. Abdul Wahab, M. L. Othman, M. Zurwatul, A. M. Jaffar, H. Beiranvand, “Optimal design of power system stabilizer for multimachine power system using farmland fertility algorithm”, Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 12, September 2020.
- [24] L. Vetoshkin, Z. K. Muller, “Dynamic Stability Improvement of Power System by Means of STATCOM With Virtual Inertia”, IEEE Access, Vol. 9, August 2021.
- [4] M. Maleki, S. Abazari, N. Mahdian, “Dynamic Stability Improvement of Power System With Simulation and Coordinated Control of DFIG and UPFC using LMI”, International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization, Vol. 4, No. 3, pp. 341-353, July, 2021.
- [5] B. K. Dubey, N. K. Singh, “Multi machine power system stability enhancement with UPFC using linear quadratic regulator techniques”, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 219-229, April 2020.
- [6] A. M. M. Rashad, S. Kamel, F. Jurado, “Stability improvement of power systems connected with developed wind farms using SSSC controller”, Ain Shams Engineering Journal, November 2017.
- [7] S. Abazari, S. Ghaedi, “Improvement of Dynamic Stability of Multi-Machine Power Systems using TCSC and Fuzzy Control Method”, Tabriz Journal of Electrical Eng., Vol. 45, No. 2, pp. 1-10, 2015.
- [8] M. Maleki Rizi, S. Abazari, N. Mahdian, “Dynamic Stability Improvement in Power System with Simultaneously and Coordinated Control of DFIG and UPFC”, Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 43-56, 2022.
- [9] S. Shojaeain, J. Soltani, Gh. Arab, “Damping of Low Frequency Oscillations of Multi-Machine Multi-UPFC Power Systems, Based on Adaptive Input-Output Feedback Linearization Control”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 27, Nov 2012.
- [10] T. K. Roy, M. A. Mahmud, A. M. T. Oo, “Robust Adaptive Back stepping Excitation Controller Design for Higher-Order Models of Synchronous Generators in Multi machine Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 34, No. 1, 2019.
- [11] Saeed Abazari, Omid Moradi, “Improvement Damping Power System by using UPFC and Tuning Controller Parameter base on a New PSO Algorithm”, Tabriz Journal of Electrical Eng., Vol. 46, No. 1, pp. 1-11, spring 2016.
- [12] B. K. Dubey, N. K. Singh, “Multi machine power system stability enhancement with UPFC using linear quadratic regulator techniques”, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, Vol. 11, pp. 219-229, April 2020.
- [13] Y. Chi, Y. Xu, “Multi-objective robust tuning of

---

<sup>1</sup> Doubly Fed Induction Generator

<sup>2</sup> Static Series Synchronous Compensator

<sup>3</sup> Multi Input Back stepping control

<sup>4</sup> Sliding Mode Observer

<sup>5</sup> Flexible Alternative Current Transmission systems

<sup>6</sup> Linear Matrix Inequality

<sup>7</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>8</sup> Rotor Side Converter

<sup>9</sup> Grid Side Converter