



Semnan University



Research Article

Improving Power System Stability in the Presence of IPFC and DFIG

Saeed Abazari ^{a,*}, Farshid Raeisianfard ^a, Ahmad Hashemi Esfahanian ^a

^a Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-09

Revised: 2025-02-14

Accepted: 2025-03-15

Keywords:

Synchronous generator;

DFIG;

IPFC;

Sliding mode control;

Finite time sliding mode control.

ABSTRACT

In this paper, the improvement of power system stability in the presence of Interline Power Flow Controller and Doubly-Fed Induction Generator is addressed. The control approach used here is based on finite-time sliding mode control, which demonstrates a high level of robustness against parameter variations compared to traditional linear control methods. Due to its resilient structure, this method ensures system stability despite parameter changes, shifts in disturbance location, and reasonable temporal fluctuations in the occurrence of faults. The control technique is implemented on the Doubly-Fed Induction Generator, synchronous generators, and the Interline Power Flow Controller while observing practical constraints. This method has less chattering compared to the sliding mode control, shorter rise and settling times, higher damping speed, and greater robustness against parameter variations. To evaluate the effectiveness of this approach, the IEEE New England 39-bus test system is used, where simulation results highlight the controller's impact on stability enhancement, even under imposed limitations.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35852.2751>

© 2025 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: abazari-s@eng.sku.ac.ir

How to cite this article:

Abazari, S. , Reisanfard, F. and Hashemi Esfahanin, A. (2025). Improving Power System Stability in the Presence of IPFC and DFIG. Journal of Modeling in Engineering, 23(83), 167-180. doi: 10.22075/jme.2025.35852.2751

بهبود پایداری سیستم قدرت در حضور IPFC و DFIG

سعید اباذری^{۱*}، فرشید رئیس‌یان فرد^۱، احمد هاشمی اصفهانیان^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹	در این مقاله، به بهبود پایداری سیستم قدرت در حضور کنترل‌کننده جریان توان بین‌خطی و ژنراتور القایی دوسوتغذیه پرداخته شده است. روش کنترلی به‌کاررفته مبتنی بر کنترل حالت لغزشی زمان محدود است که قابلیت بالایی در مقابله با تغییرات پارامتری سیستم در قیاس با روش‌های کنترلی خطی مرسوم دارد. این روش، به دلیل ساختار مقاوم خود، پایداری سیستم را در برابر تغییرات پارامترها، تغییر مکان اختلال، و نیز تغییرات زمانی معقول در وقوع اختلال تضمین می‌نماید. این روش کنترلی بر روی ژنراتور القایی دوسوتغذیه، ژنراتورهای سنکرون و کنترل‌کننده جریان توان بین خطی با رعایت محدودیت‌ها پیاده‌سازی گردیده است. این روش نسبت به روش کنترل لغزشی دارای چترینگ کمتر، زمان صعود و نشست کمتر و سرعت میرایی بالاتر و در برابر تغییر پارامترها مقاوم‌تر می‌باشد. برای ارزیابی کارایی این روش، از شبکه ۳۹ باسه NEW ENGLAND استفاده شده که نتایج شبیه‌سازی تاثیر این کنترل‌کننده را با رعایت محدودیت‌ها در جهت بهبود پایداری نشان می‌دهد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵	
واژگان کلیدی: ژنراتور سنکرون، DFIG IPFC کنترل حالت لغزشی، کنترل حالت لغزشی زمان محدود.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35852.2751>

© 2025 Published by Semnan University Press.

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

۱- مقدمه

است [۴]. یکی از این تجهیزات، کنترل‌کننده جریان توان بین‌خطی (IPFC) است. IPFC با کنترل هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو در چندین خط انتقال موازی، توزیع توان را در شبکه بهینه‌سازی کرده و موجب بهبود پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم قدرت در شرایط متغیر بار و خطا می‌شود [۵ و ۶]. علاوه بر بهینه‌سازی توزیع توان، این تجهیز می‌تواند با تزریق یا جذب توان راکتیو ولتاژ را در محدوده مطلوب نگه‌داشته و تغییرات ناگهانی ولتاژ را کنترل کند. همچنین این تجهیز با توجه به استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در ساخت آن که سرعت بالایی دارا هستند، قادر است سریعاً توزیع توان را بهبود دهد و به پایداری نوسان اول کمک کند [۷]. همچنین، IPFC با تغییر لحظه‌ای توان اکتیو در چندین خط انتقال به طور هم‌زمان، از رشد نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه جلوگیری کرده و منجر به

امروزه با افزایش تعداد مصرف‌کنندگان و تقاضای رو به رشد انرژی، نیاز به بهره‌برداری از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال بیش از پیش احساس می‌شود [۱]. به دلیل محدودیت‌های فیزیکی، اقتصادی و محیطی، احداث خطوط جدید اغلب امکان‌پذیر نیست و علاوه بر این، محدودیت‌های عایقی، حرارتی و پایداری نیز مانعی برای بهره‌برداری از ظرفیت کامل خطوط فعلی به شمار می‌روند [۲ و ۳]. از این‌رو، نیاز به عناصری که بتوانند ظرفیت انتقال خطوط قدرت را افزایش داده و عملکرد شبکه را بهبود بخشند، بسیار اهمیت یافته است. با پیشرفت فناوری و توسعه الکترونیک قدرت، استفاده از عناصر انعطاف‌پذیر AC (FACTS) به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی توزیع توان و افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم‌های قدرت مطرح شده

² Flexible AC Transmission System

³ Interline Power Flow Controller

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: abazari-s@eng.sku.ac.ir

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استناد به این مقاله:

سیستم‌های غیرخطی و نامعین و پایداری گام‌به‌گام در سطح کل سیستم دارد، اما در شبکه‌های قدرت بسیار بزرگ و که نیاز به محاسبات سریع و ساده دارند، این روش ممکن است پیچیدگی داشته باشد. [۱۹ و ۲۰].

به دلیل آن که IPFC می‌تواند انتقال قدرت را بین خطوط به طور همزمان تغییر دهد از این جهت مطالعه پایداری آن همراه با DFIG می‌تواند دارای اهمیت باشد. در این مقاله، در جهت بهبود پایداری سیستم، روش کنترلی حالت لغزشی زمان محدود (FTSMC)^۶ به طور همزمان بر روی IPFC و ژنراتور سنکرون با توجه به محدودیت‌های ورودی سیستم، به کار برده شده است. این روش ضمن ارائه پایداری در بازه زمانی محدود، چترینگ پایین‌تری نسبت به روش کنترل حالت لغزشی SMC^۷ دارد و در برابر تغییرات پارامتری، تغییرات توپولوژی، تغییر محل و زمان اختلال مقاوم است.

این روش می‌تواند به سرعت همگرایی بالاتر، عملکرد دقیق‌تر در شرایط گذرا، و قابلیت بهبود عملکرد پایداری سیستم تحت اغتشاشات شدید کمک قابل توجهی نماید. ساختار مقاله شامل مدل‌سازی اجزای سیستم قدرت از جمله ژنراتورهای سنکرون و DFIG، معرفی مدل IPFC و روش کنترلی، و نهایتاً ارائه نتایج شبیه‌سازی می‌باشد. متغیرهای استفاده شده در فرمول‌ها و روابط ریاضی در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

۲- مدل‌سازی سیستم

در این بخش، به مدل‌سازی سیستم و کنترلر پرداخته می‌شود. در ابتدا مدل ژنراتور سنکرون معرفی می‌گردد، سپس مدل DFIG ارائه می‌شود. در گام بعدی مدل IPFC معرفی می‌گردد و پس از ارائه مدل کلی سیستم، در نهایت محاسبات و مدل کنترلرهای SMC و FTSMC ارائه می‌شود.

۲-۱- مدل ژنراتور سنکرون

در این مطالعه مدل مرتبه سوم برای ژنراتورها در نظر گرفته شده است [۲۱]. در این مدل u_{fi} ورودی کنترلی سیستم تحریک ژنراتور می‌باشد.

برای ژنراتور i -ام و $i = 1, 2, \dots, n$:

بهبود پایداری می‌گردد [۸]. به علاوه، مزیت‌های ذکر شده باعث می‌شود که این تجهیز برای حالت پایدار شبکه نیز مؤثر باشد [۹ و ۱۰].

همچنین با توجه به مسائل زیست‌محیطی استفاده از انرژی‌های پاک نظیر انرژی باد و تبدیل آن به انرژی الکتریکی در حال گسترش است. فناوری‌های موجود در توربین‌های بادی شامل چهار دسته A, B, C و D می‌باشند که به ترتیب از ژنراتور سنکرون، ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)^۴، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)^۵ و ژنراتور القایی با روتور قفسه‌دار استفاده می‌کنند. هر کدام از این فناوری‌ها ویژگی‌ها و قابلیت‌های خاص خود را دارند. فناوری DFIG با توجه به مزایایی از جمله طراحی ساده، قابلیت کنترل پذیری بالا و پاسخ دینامیکی مطلوب گزینه‌ای رایج در استفاده از توربین بادی در سیستم قدرت است [۱۱ و ۱۲].

دستیابی به پایداری و نقطه تعادل سیستم قدرت از موضوعات مهمی است که در برخی تحقیقات با استفاده از روش‌های خطی پیگیری شده است. با این حال، این روش‌ها علیرغم ویژگی سادگی در تحلیل و سرعت بالا در حل مسائل کنترلی، به دلیل عدم توانایی در خطی‌سازی حول نقطه کار حین اختلالات شدید و سریع، از اعتبار کافی برخوردار نیست [۱۳ و ۱۴]. لذا ضرورت استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی نظیر کنترل فازی، خطی‌سازی با فیدبک، کنترل مبتنی بر تابع انرژی، روش پسگام چندورودی و کنترل حالت لغزشی نیز مطرح گردیده است.

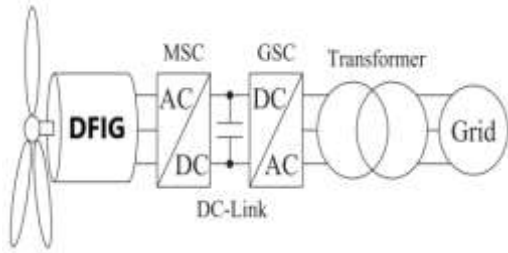
در این میان، کنترل فازی به دلیل توانایی کنترل سیستم‌های پیچیده، عدم نیاز به مدل دقیق ریاضی و پاسخ مناسب در حالت‌های عدم قطعیت از مزایای قابل توجهی برخوردار است، اما در مواجهه با تغییرات توپولوژی سیستم، کارایی مطلوبی ندارد و نیاز به تنظیم مجدد و بازطراحی قوانین کنترلی و بهینه‌سازی پارامترها دارد [۱۵ و ۱۶]. روش مبتنی بر تابع انرژی با وجود توانایی تشخیص و تحلیل وضعیت پایدار سیستم و تشخیص دقیق نواحی پایداری به دلیل پیچیدگی و محاسبات زیاد در سیستم‌های بزرگ در برخی کاربردها محدودیت‌هایی دارد [۱۷ و ۱۸]. در روش پسگام نیز در کنار مزیت‌هایی که همچون قابلیت تطبیق با

⁶ Finite Time Sliding Mode Control

⁷ Sliding Mode Control

⁴ Doubly Fed Induction Genaretor

⁵ Permanent Magnet Synchronous Generator



شکل ۱- شمای کلی DFIG متصل به شبکه

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = (\omega_i - \omega_s) - \frac{X_i - \hat{X}_i}{\hat{E}_i T_{0i} \hat{X}_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\ \quad + \frac{\omega_s}{\hat{E}_i} (u_{df1i} \cos(\delta_i)) + u_{df2i} \sin(\delta_i) \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_s}{2H_i} \left[P_{mi} \frac{\omega_s}{\omega_i} - \frac{\hat{E}_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{\hat{X}_i} \right] \\ \dot{E}_i = \frac{1}{T_{0i}} \left[-\frac{X_i}{\hat{X}_i} \hat{E}_i + \frac{X_i - \hat{X}_i}{\hat{X}_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \right] \\ \quad + T_{0i} \omega_s (u_{df1i} \sin(\delta_i) - u_{df2i} \cos(\delta_i)) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $u_{df1} = V_{ri} \cos(\Phi_{ri})$ و $u_{df2i} = V_{ri} \sin(\Phi_{ri})$ بوده و V_{ri} و Φ_{ri} به ترتیب دامنه و فاز RCS هستند. بنابراین معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{0i} \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{2H_i} \left[P_m \frac{\omega_s}{\omega_i} - \frac{\hat{E}_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{\hat{X}_i} \right] \\ \dot{E}_i = f_{di}(x) + g_{d1i}(x) u_{df1i} + g_{d2i}(x) u_{df2i} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \omega_{0i} = \omega_s + \frac{X_i - \hat{X}_i}{\hat{E}_i T_{0i} \hat{X}_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\ \quad - \frac{\omega_s}{\hat{E}_i} (u_{df1i} \cos(\delta_i) + u_{df2i} \sin(\delta_i)) \\ f_{di}(x) = \frac{1}{T_{0i}} \left[-\frac{X_i}{\hat{X}_i} \hat{E}_i + \frac{X_i - \hat{X}_i}{\hat{X}_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \right] \\ g_{d1i}(x) = \omega_s \sin(\delta_i) \\ g_{d2i}(x) = \omega_s \cos(\delta_i) \end{cases} \quad (4)$$

در معادله (۴) متغیرهای ω_{0i} ، g_{d1i} و g_{d2i} توسط معادله (۱) بدست می‌آیند.

۲-۳- مدل سازی IPFC

شکل (۲) ساختار پایه یک IPFC را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - \hat{E}_{qi} I_{qi}] \\ \dot{\hat{E}}_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (u_{fi} - \hat{E}_{qi} - (x_{di} - \hat{x}_{di}) I_{di}) \end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱- متغیرهای به کار رفته در مقاله

نشانه	توضیح
δ_i	زاویه روتور ژنراتور i-ام
ω_i	سرعت روتور ژنراتور i-ام
\hat{E}_{qi}	ولتاژ داخلی ژنراتور i-ام در محور q
\hat{E}_i	ولتاژ داخلی ژنراتور i-ام
u_{fi}	ولتاژ تحریک ژنراتور i-ام
M_i	ممان اینرسی ژنراتور i-ام
P_{mi}	توان مکانیکی ورودی ژنراتور i-ام
u_d	سیگنال کنترل DFIG
δ_{0i}	زاویه روتور ژنراتور i-ام در حالت ماندگار
ω_{0i}	سرعت روتور ژنراتور i-ام در حالت ماندگار
V_i	دامنه ولتاژ ترمینال ژنراتور i-ام
θ_i	زاویه ولتاژ ترمینال ژنراتور i-ام
T_{d0i}	ثابت زمانی سیم‌پیچ تحریک ژنراتور i-ام
x_{di}	راکتانس محور d ژنراتور i-ام در حالت ماندگار
\hat{x}_{di}	راکتانس محور d ژنراتور i-ام در حالت گذرا
x_{qi}	راکتانس محور q ژنراتور i-ام در حالت ماندگار
X_i	راکتانس معادل DFIG در حالت ماندگار
\hat{X}_i	راکتانس معادل DFIG در حالت گذرا

۲-۲- مدل DFIG

مطابق شکل (۱) DFIG دارای دو کانورتر الکترونیک قدرت به نام‌های RSC^۸ و GSC^۹ است. شایان ذکر است که در اینجا بهبود پایداری در سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته و RSC تأثیر اصلی را بر پایداری دارد؛ بنابراین، در مدل ارائه شده، ورودی‌های RSC ورودی‌های کنترلی هستند. مدل در نظر گرفته شده به عنوان مدل ژنراتور سنکرون برای DFIG شناخته می‌شود. در این مدل، معادلات معادل ژنراتور سنکرون برای مدل سازی DFIG به کار گرفته می‌شوند. در به کارگیری این مدل، یکی از شرایط لازم فرض کردن مقاومت استاتور به عنوان صفر است. بدین ترتیب معادلات DFIG مشابه معادلات ژنراتور سنکرون به صورت روابط (۲) معرفی می‌گردد. [۲۲]:

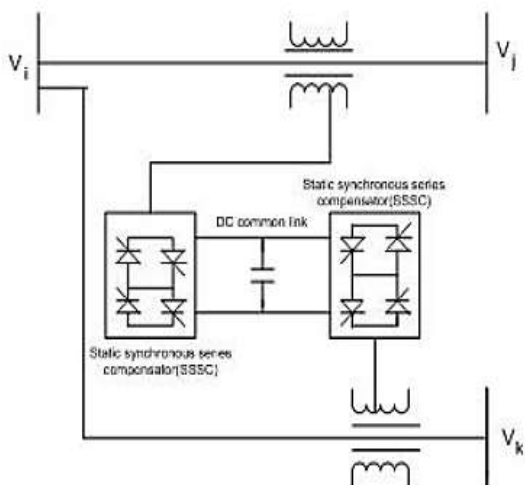
^۹ Grid-Side Converter

^۸ Rotor-Side Converter

حالت معادلات جبری تعادل توان همه باس‌هایی که به ژنراتورها متصلند، باس‌های متصل به DFIG و IPFC به صورت زیر است [۲۵]:

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

در معادله (۷)، N تعداد کل باس‌های متصل به ژنراتور، DFIG و IPFC است و B_{ij} المان ماتریس امپدانس کاهش یافته کل شبکه است.



شکل ۳- شماطیک مدل ساده شده IPFC

با مشتق‌گیری از روابط (۷) و جداسازی متغیرها، خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_{n+l+2} \\ \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{n+l+2} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,2(n+l+2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{2N,1} & \cdots & c_{2N,2(n+l+2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}'_{q1} \\ \vdots \\ \dot{E}'_{qn} \\ \dot{\delta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\delta}_n \end{bmatrix} \quad (۸)$$

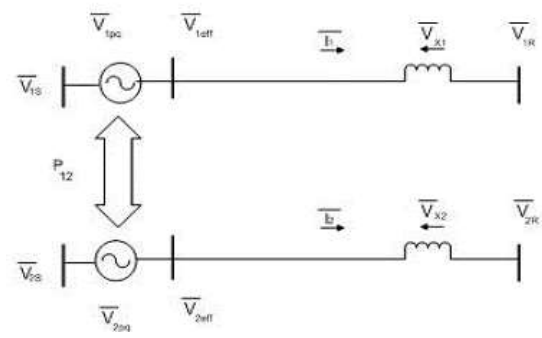
$$- \begin{bmatrix} k_{1,1} & \cdots & k_{1,n+l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{2N,1} & \cdots & k_{2N,n+l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_{n+l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ f_{2N,1} & f_{2N,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_{ds} \\ \dot{u}_{qs} \end{bmatrix}$$

یک ساختار ابتدایی IPFC شامل دو کانورتور DC به AC پشت‌به‌پشت است که هر کدام با تزریق ولتاژ سری یک خط انتقال را جبران می‌کنند [۲۳]. می‌توان گفت IPFC در واقع دو SSSC^{۱۰} است که توسط یک لینک DC مشترک به هم متصل هستند. مطابق شکل (۳)، دو منبع ولتاژ سنکرون با فازورهای V_{1pq} و V_{2pq} که به صورت سری با خطوط انتقال ۱ و ۲ قرار گرفته‌اند، نشان‌دهنده دو مبدل پشت‌به‌پشت DC به AC هستند.

لینک DC مشترک توسط یک لینک دوطرفه برای تبادل توان حقیقی بین دو ولتاژ خطوط انتقال نمایش داده شده است. این لینک توسط راکتانس X_1 به عنوان باس انتهایی فرستنده با فازور ولتاژ V_{1s} و باس انتهایی گیرنده با فازور ولتاژ V_{1r} نمایش داده شده است. فازور ولتاژ انتهایی فرستنده خط ۲، که توسط راکتانس X_2 نمایش داده می‌شود، V_{2s} است و فازور ولتاژ انتهایی گیرنده V_{2r} می‌باشد. بدون در نظر گرفتن مقاومت خط، جریان توان در انتهای گیرنده می‌تواند مطابق با معادلات (۵) و (۶) تخمین زده شود [۲۴].

$$P_r = \frac{V^2}{X} \sin \delta + \frac{V_{1r} V_{pq}}{X} \sin(\delta + \rho) \quad (۵)$$

$$Q_r = \frac{V^2}{X} \cos(\delta - 1) + \frac{V_{1r} V_{pq}}{X} \cos(\delta + \rho) \quad (۶)$$



شکل ۲- طرح پایه IPFC

۲-۴- مدل کلی سیستم

در این قسمت معادلات کلی سیستم، با در نظر گرفتن IPFC معرفی می‌شوند. بدون از دست رفتن کلیت موضوع، فرض می‌شود IPFC متشکل از دو SSSC است که به ترتیب بین باس‌های i_1 و j_1 ، و i_2 و j_2 قرار دارند. در این

¹⁰ Static Synchronous Series Compensator

$$\begin{cases} \dot{\delta}_k = \omega_k - \omega_0 \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k}(T_{Lk} - T_{ek}) \\ \dot{i}_{qk} = \frac{R_k}{L_k}i_{qk} - \frac{1}{L}u_{qk} + \frac{p_{nk}\psi_{fk}}{L_k}\omega_k \\ T_{ek} = \frac{3}{2}p_{nk}\psi_{fk}i_{qk} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}H_j + \sum_{j=1}^N b_{ij}S_j + \sum_{j=1}^N a'_{ij}E_{fij} + \sum_{j=1}^N b'_{ij}u_{qij} + \sum_{j=1}^N g_{ij}u_{sij} \\ \dot{\theta}_i = \sum_{j=1}^N a_{i+N,j}H_j + \sum_{j=1}^N b_{i+N,j}S_j + \sum_{j=1}^N a'_{i+N,j}E_{fij} + \sum_{j=1}^N b'_{i+N,j}u_{qij} + \sum_{j=1}^N g_{i+N,j}u_{sij} \end{cases} \quad (16)$$

معادلات (۱۴) مربوط به ژنراتورهای سنکرون، روابط (۱۵) مربوط به DFIG و روابط (۱۶) مربوطه ولتاژ باسها می‌باشند.

۲-۵- مدل سازی کنترلر حالت لغزشی

در مرحله اول روند طراحی، متغیرهای خطای زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} e_{1i} = \delta_i - \delta_{0i} \\ e_{2i} = \omega_i - \omega_{0i} \\ e_{3i} = \frac{1}{M_i}(p_{mi} - p_{ei}) \end{cases} \quad (17)$$

که در آن δ_{0i} زاویه داخلی آمین ژنراتور در شرایط حالت ماندگار (قبل از رخ دادن هر فالت احتمالی)، ω_{0i} سرعت ژنراتور i-ام در حالت ماندگار ($\frac{1}{M_i} = \frac{\omega_{0i}}{2H_i}$) و p_{ei} توان الکتریکی ژنراتور i-ام در حالت دائمی است.

$$p_{ei} = \begin{cases} \frac{\dot{E}_{qi}V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{\dot{x}_{di}} \\ + \frac{V_i^2 \sin 2(\delta_i - \theta_i)}{2x_{qi}\dot{x}_{di}} (\dot{x}_{di} - x_{qi}) \\ 1 < i < n1 \\ \frac{\dot{E}_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{\dot{x}_{di}} \\ n1 + 1 < i < n \end{cases} \quad (18)$$

حال با استفاده از روابط (۱)، رابطه (۹) برای تمامی ژنراتورهای سنکرون به دست می‌آید:

$$\begin{cases} h_i = \frac{1}{T'_{doi}}(-E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di}) \\ \dot{E}'_{qi} = h_i + \frac{1}{T'_{doi}}E_{fi} \end{cases} \quad (9)$$

و با استفاده از روابط (۳) و (۴) برای DFIG رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} s_k = \frac{R_k}{L_k}i_{qk} + \frac{p_{nk}\psi_{fk}}{L_k}\omega_k \\ \dot{i}_{qk} = s_k - \frac{1}{L}u_{qk} \end{cases} \quad (10)$$

فرم ماتریسی روابط (۸) با در نظر گرفتن روابط (۹) و (۱۰) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$[C] \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = -[D] \begin{bmatrix} h_i \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} - [K] [s_k] - [D'] [E'_{fi}] - [K'] [u_{qk}] - [F] [u_s] \quad (11)$$

که در آن $[D'] = \frac{1}{T'_{doi}}[D]$ و $[K'] = \frac{1}{L}[K]$ می‌باشد. ورودی کنترلی ژنراتورهای سنکرون، u_{qk} ورودی کنترلی DFIG و u_s ورودی کنترلی مربوط به SSSCها (IPFC) است. با حل معادله (۱۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = [A][H] + [B][s_k] + [A'] [E'_{fi}] + [B'] [u_{qk}] + [G][u_s] \quad (12)$$

که در این رابطه

$$\begin{aligned} [A] &= -[C]^{-1}[D], & [B] &= -[C]^{-1}[K] \\ [G] &= -[C]^{-1}[F], & [H] &= \begin{bmatrix} h_i \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

در نهایت معادلات کلی سیستم با وجود ژنراتورهای سنکرون، DFIG و IPFC به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i}[P_{mi} - P_{ei}] \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{doi}} \left(-\frac{X_{di}}{X'_{di}} E'_{qi} + \frac{X_{di} - X'_{di}}{X'_{di}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + E_{fi} \right) \\ P_{ei} = \frac{1}{X'_{di}} E'_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{X'_{di} - X_{qi}}{2X'_{di} X_{qi}} V_i^2 \sin(2(\delta_i - \theta_i)) \end{cases} \quad (14)$$

۲-۵-۱- طراحی SMC^{۱۱}

در فرآیند طراحی SMC، سطح لغزش به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$s_i = K_{1i}e_{1i} + K_{2i}e_{2i} + e_{3i} \quad (19)$$

سطح لغزش i -ام مربوط به ژنراتور i -ام است.

با جایگزینی مشتق رابطه (۱۸) در رابطه (۱۹)، نتیجه زیر حاصل خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{e}_{1i} = e_{2i} \\ \dot{e}_{2i} = e_{3i} \\ \dot{e}_{3i} = f_i(x) + \sum_{j=1}^n g_{sj}u_{fj} \\ + \sum_{j=1}^3 g_{Rij}R_j \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= K_{1i}e_{2i} + K_{2i}e_{3i} + f_i(x) \\ &+ \sum_{j=1}^n g_{sij}u_{fj} + \sum_{j=1}^3 g_{Rij}R_j \end{aligned} \quad (21)$$

فرم ماتریسی معادله (۲۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{s} = K_1e_2 + K_2e_3 + F(x) + G_sU_f + G_{RR} \quad (22)$$

با قرار دادن $\dot{s} = 0$ خواهیم داشت:

$$U_{feq} = G_s^{-1}(-K_1e_2 - K_2e_3 - F(x) - G_{RR}) \quad (23)$$

بنابراین قانون کنترل SMC برای ژنراتور i -ام برابر زیر است:

$$u_{fi} = U_{feqi} + K_{Si}sign(s_i) \quad (24)$$

۲-۵-۲- طراحی FTSMC

در این بخش، روش طراحی یک کنترل کننده حالت لغزشی زمان محدود ارائه می‌شود. در این حالت، سطح لغزش برای هر ژنراتور یک فرم کسری دارد [۲۶]:

$$s_i = K_{1i}e_{1i}^{\gamma_1} + K_{2i}e_{2i}^{\gamma_2} + e_{3i} \quad (25)$$

ترتیب انتخاب شده در هر سطح لغزش، عددی بین صفر و یک است. نتیجه اعمال این روش منجر به پاسخ کنترلی

سریع‌تر و کاهش چشمگیر پدیده چترینگ می‌شود. در معادله (۱۴)، برای این که شرایط FTSMC برآورده شود بایستی شرط $\gamma_1 = \frac{\gamma_2}{2-\gamma_2}$ برقرار باشد. با انجام رویه‌ای مشابه با آنچه برای SMC معمولی انجام شد قانون کنترلی زیر به دست خواهد آمد:

$$U = -\gamma_2 K_2 e_3 e_2^{\gamma_2-1} - \gamma_1 K_1 e_2 e_1^{\gamma_1-1} \quad (26)$$

$$u_i = -\gamma_2 K_{2i} e_{3i} e_{2i}^{\gamma_2-1} - \gamma_1 K_{1i} e_{2i} e_{1i}^{\gamma_1-1} \quad (27)$$

$$u_{fi} = G_{si}^{-1}(-F(x) - G_{RR} - sat(u_i, u_{si}) - K_{Si}sign(s_i)) \quad (28)$$

با مقایسه معادله (۲۴) یعنی سیگنال کنترلی طراحی شده در SMC معمولی و معادلات (۲۷) و (۲۸) برای FTSMC مشاهده می‌شود که در روش SMC از تابع sign استفاده شده در حالی که در FTSMC تابع اشباع به کار برده شده است. این موضوع مقدار زیادی از چترینگ را در FTSMC می‌کاهد. به علاوه در FTSMC سه پارامتر قابل کنترل طراحی شده‌اند که γ_1 ، K_1 و K_2 می‌باشند. این پارامترها پایداری و همگرایی سیستم را در یک زمان محدود و قابل تنظیم تضمین می‌کنند. اثبات کلی این روش کنترل پیشنهادی در یک سیستم π -بعدی در ضمیمه A آمده است.

در شکل (۴)، پیکربندی کلی برای کنترل سیستم قدرت در حضور DFIG و IPFC نشان داده شده است.

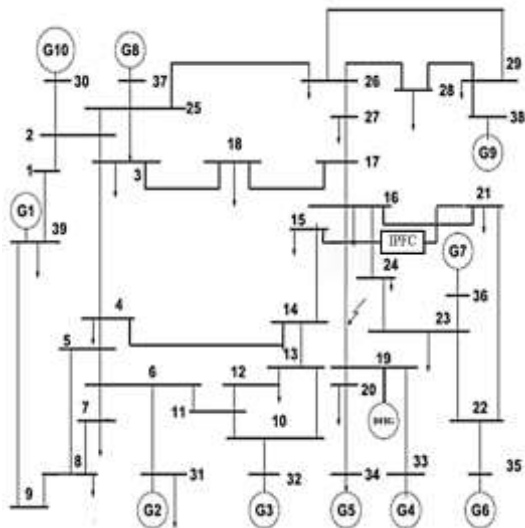
۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، در ابتدا به معرفی سیستم مورد مطالعه به همراه IPFC و DFIG پرداخته می‌شود. در ادامه بهبود پایداری سیستم در اثر بروز اختلال مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها به مقاوم بودن روش کنترل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳-۱- معرفی سیستم

برای نشان دادن اثربخشی FTSMC پیشنهادی در پایدارسازی کل سیستم قدرت در شرایط مختلف عملیاتی، یک شبیه‌سازی زمانی انجام می‌شود. سیستم قدرت در نظر گرفته‌شده، شبکه استاندارد ۳۹ باسه NEW

^{۱۱} Sliding Mode Control

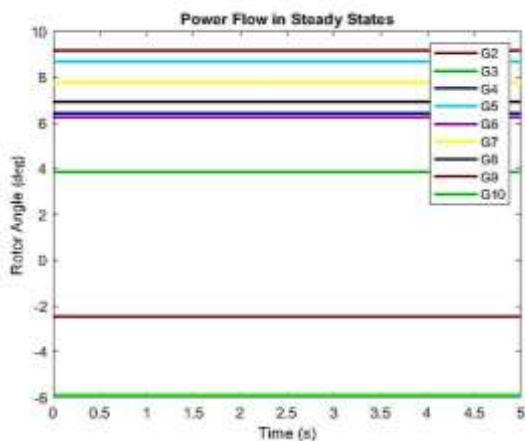


شکل ۵- شبکه ۳۹-باسه NEW ENGLAND شامل IPFC و DFIG

در زمان 500 msec یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت 150 msec در نزدیکی ژنراتور ۴ اعمال می‌شود.

پارامترهای FTSMC برای این شبیه‌سازی $\gamma_{2i} = 3.5$ و K_{1i} و K_{2i} برابر 0.7 انتخاب شده‌اند.

ابتدا یک پخش بار بدون وجود خطا و بدون استفاده از IPFC و DFIG انجام گرفت که نقطه کار اولیه در شکل (۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۶- زوایای روتور ژنراتورها در حالت پایدار، بدون خطا و حضور IPFC و DFIG

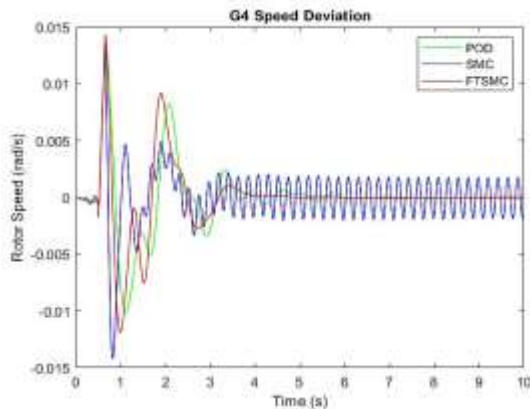
سپس همان‌طور که گفته شد، در زمان 500 msec خطایی به مدت 150 msec اعمال می‌گردد. در ابتدا رفتار سیستم قدرت بدون اعمال هیچ کنترل‌کننده‌ای مطالعه و نتیجه مطابق شکل (۷) آورده شده است.

ENGLAND فرض شده است. شکل (۵) نمودار تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. در این سیستم، یک DFIG در ۱۹ باس اضافه گردیده و یک ایمن IPFC بین باس‌های شماره ۱۵ و ۲۱ قرار داده شده است. دلیل استفاده از IPFC در این محل، بیشترین افت ولتاژ در این باس‌ها بعد از وقوع یک خطای اتصال کوتاه است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، محدودیت‌های عملی برای ورودی‌های کنترلی در نظر گرفته شده است [۲۵]. مشخصات و پارامترهای ژنراتورهای سنکرون و DFIG و IPFC در [۱۰ و ۲۰] آمده است.

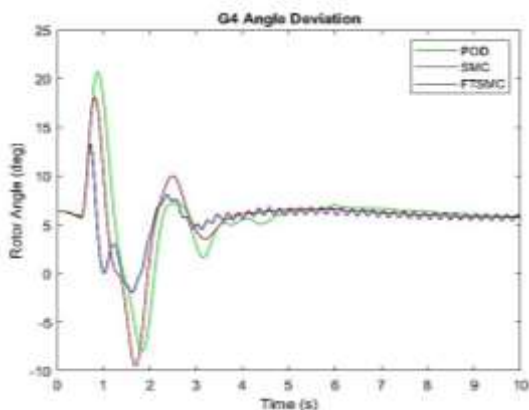


شکل ۴- فلوچارت شبیه‌سازی سیستم قدرت در حضور IPFC و DFIG با اعمال FTSMC

کنترل کننده‌ای است که برای کاهش نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت به کار می‌رود و یک کنترلر مرسوم جهت FACTS به شمار می‌رود. از این رو در مرحله اول، این کنترلر را جهت استفاده برای کنترل IPFC در شبکه مدنظر به کار برده می‌شود. در ادامه رفتار این کنترل کننده را با کنترل کننده‌های غیرخطی پیشنهادی (SMC و FTSMC) اعمال شده مقایسه شده است.

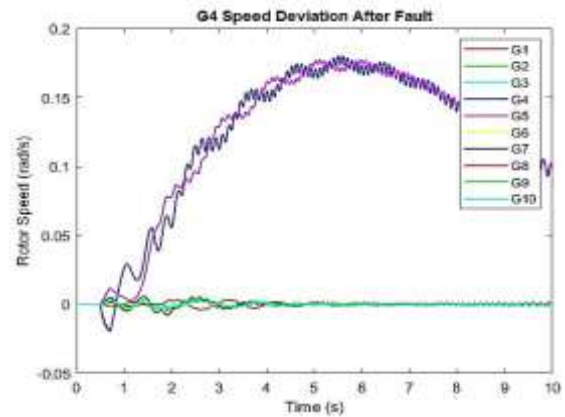


شکل ۹: تغییرات سرعت زاویه‌ای G4 با کنترلرهای POD، FTSMC و SMC



شکل ۱۰: تغییرات زاویه روتور G4 با کنترلرهای POD، SMC و FTSMC

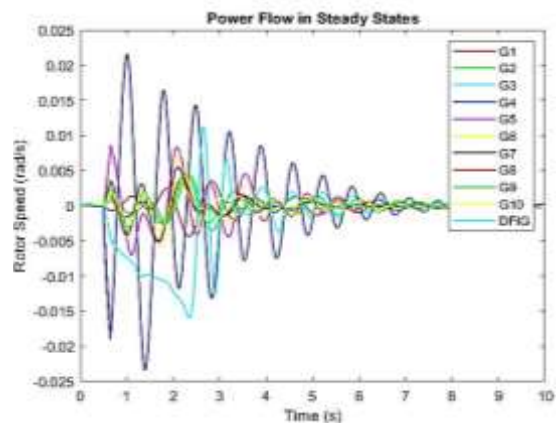
در شکل‌های (۹) و (۱۰) رفتار تغییرات سرعت زاویه‌ای و زاویه روتور ژنراتور G4 با کنترل کننده‌های معرفی شده آمده است. و در شکل (۱۱) نمودار دیاگرام فاز این ژنراتور ترسیم شده است. همچنین تاثیر این کنترلرها بر روی رفتار DFIG در شکل (۱۲) آمده است. که نشان می‌دهد رفتار DFIG بهتری از خود نشان می‌دهد. شکل‌های (۹) و (۱۰)، کاهش دامنه نوسان و بهبود پایداری را با استفاده از کنترلر FTSMC نشان می‌دهند. همچنین مقایسه پایداری



شکل ۷- تغییرات سرعت روتور بدون حضور DFIG و IPFC

همان طور که در شکل (۷) مشخص است ژنراتور G4 ناپایدار می‌گردد.

در ادامه، در باس ۱۹ یک DFIG اضافه گردیده و با حفظ شرایط خطا، اثر آن بر شبکه بررسی می‌شود:



شکل ۸- تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور حین خطا و در حضور DFIG بدون IPFC

همان طور که در شکل (۸) مشخص است با اضافه شدن DFIG ژنراتور G4 پایدار گردیده زیرا DFIG بخشی از توان از دست رفته را جبران می‌کند. چون بروز اختلال بر روی ژنراتور G4 و DFIG اثر بیشتری داشته است، لذا برای بررسی‌های بعدی جهت مطالعه تنها به بررسی اثر اختلال بر روی ژنراتور G4 و DFIG پرداخته می‌شود. در مطالعه بعدی، به سیستم IPFC اضافه شده و اثر پیاده سازی FTSMC بر روی سیستم قدرت بررسی شده است.

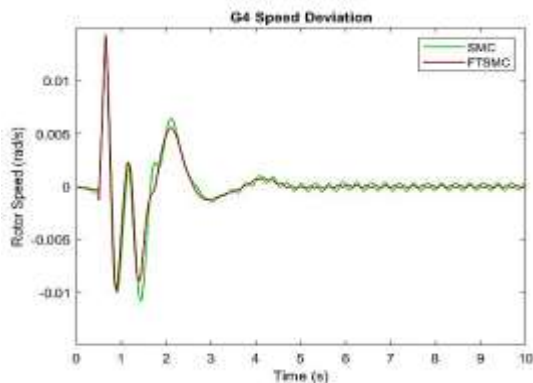
۳-۲- اضافه کردن IPFC

در ابتدا به بررسی کنترل کننده نوسانات توان (POD^{۱۲}) که

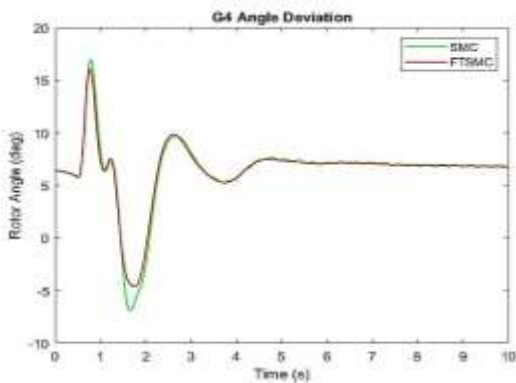
¹² Power Oscillation Damping

۳-۳- بررسی مقاوم بودن روش کنترلی در مقابل تغییر پارامترها و توپولوژی سیستم
 ۳-۳-۱- خروج خط

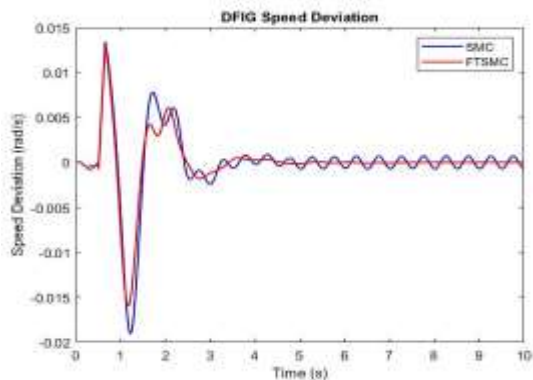
برای مطالعه مقاوم بودن این کنترل کننده، با فرض این که اتصال کوتاهی در باس ۱۹ در زمان 500 msec به مدت زمان 150 msec رخ داده است، چون اتصال کوتاه برطرف نگردیده، خط ارتباط بین باس ۱۹ و باس ۱۵ برای رفع این اتصالی قطع می شود. در حقیقت توپولوژی سیستم تغییر نموده و انتظار می رود که کنترل کننده پیشنهادی بتواند سیستم را در نقطه تعادل جدید پایدار نماید. این موضوع، در شکل های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۴- تغییرات سرعت G4 بعد از خروج خط

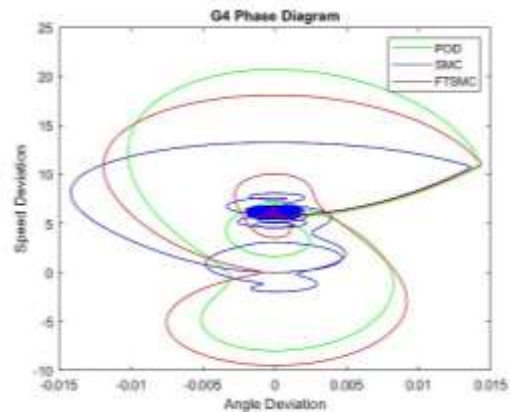


شکل ۱۵- تغییرات زاویه روتور G4 بعد از خروج خط

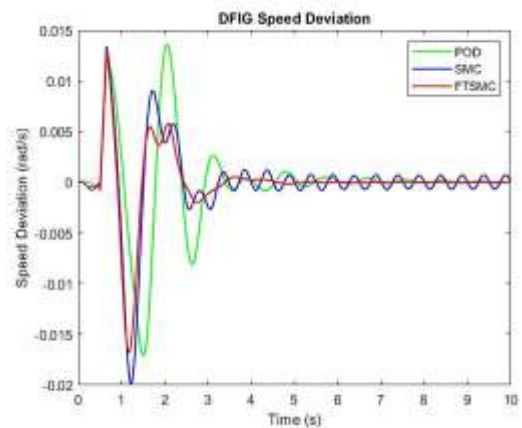


شکل ۱۶- تغییرات زاویه روتور DFIG بعد از خروج خط

روش های گفته شده بر اساس دیاگرام فاز در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

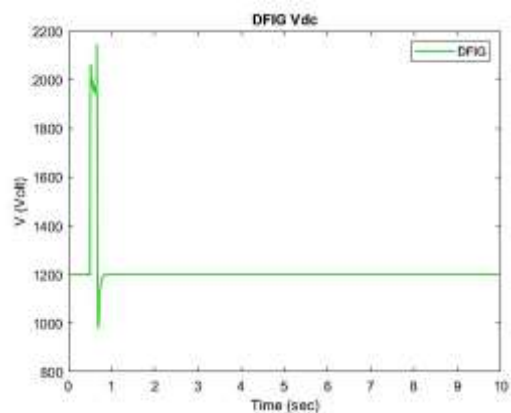


شکل ۱۱- دیاگرام فاز G4



شکل ۱۲- تغییرات سرعت زاویه ای DFIG

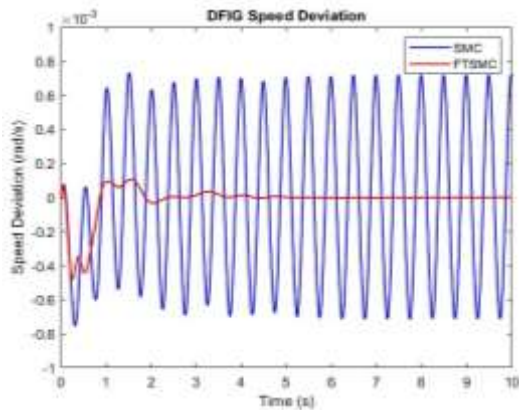
در شکل (۱۳) تغییرات ولتاژ خازن لینک dc در کانورتور سمت شبکه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود کنترلر توانسته مقدار خازن را به مقادیر قبل از خطا برساند.



شکل ۱۳- تغییرات Vdc در DFIG

در ادامه به بررسی مقاوم بودن این کنترل کننده (FTSMC) پرداخته شده است.

همچنین تغییرات سرعت زاویه‌ای DFIG نیز در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تغییرات سرعت زاویه‌ای DFIG پس از تغییر ناگهانی توان مکانیکی G8 با مقیاس 10^{-3}

با توجه به بررسی‌های انجام شده، خلاصه نتایج معیارهای کنترلی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- معیارهای کنترلی برای سرعت زاویه‌ای روتور

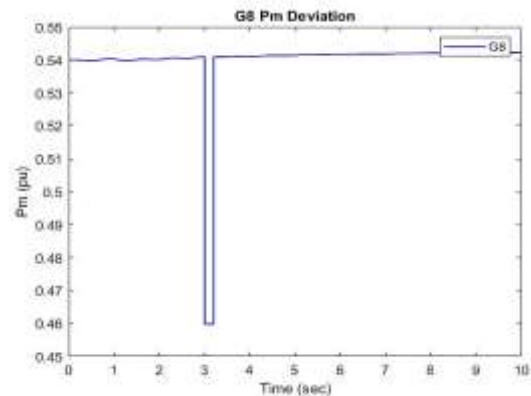
FTSMC		SMC		
بالا زدگی (درصد)	زمان نشست (sec)	بالا زدگی (درصد)	زمان نشست (sec)	
بروز خطا در باس ۱۹				
۲۳۴	۳.۵	۲۷۹	۴.۲	G4
۲۶۹	۳.۲	۲۸۱	۳.۸	DFIG
خروج خط مابین باس‌های ۱۵ و ۱۹				
۲۸۵	۴.۲	۲۹۱	۴.۹	G4
۲۸۲	۴.۲	۳۰۵	۵.۱	DFIG
تغییر توان مکانیکی G8				
۲۷۷	۴.۹	۲۹۳	۵.۲	G8
۵۱	۲.۲	۱۸۸	۲.۷	DFIG

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش FTSMC جهت بهبود پایداری استفاده شده است. این روش با روش SMC و همچنین POD مقایسه گردیده است و نتایج ارائه شده در شبیه‌سازی و معیارهای کنترلی بررسی شده در جدول ۲، کارایی روش پیشنهادی را نسبت به روش کنترل غیرخطی SMC و روش خطی POD نشان می‌دهد. همچنین نشان داده شد که این کنترل‌کننده نسبت به تغییر پارامترها، تغییر توپولوژی سیستم، تغییر زمان اختلال و محل اختلال مقاوم می‌باشد. مقایسه کیفی روش ارائه شده با روش خطی ارائه شده در مرجع [۱۳] در جدول ۳ نشان داده شده است.

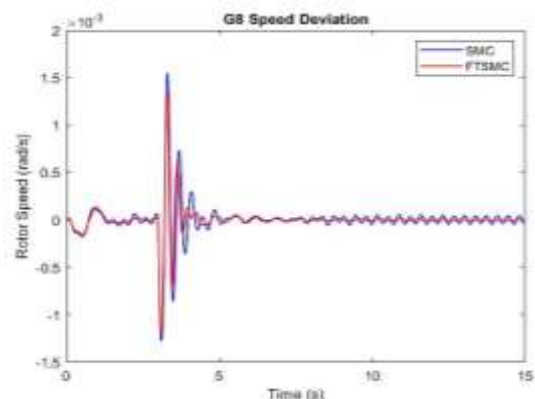
۳-۳-۲- تغییر ناگهانی در توان مکانیکی ژنراتور

برای بررسی این موضوع، فرض می‌کنیم در ثانیه ۳ توان مکانیکی ژنراتور G8، به میزان 0.15 pu و به مدت 200 msec کاهش یابد. دلیل انتخاب ژنراتور G8 کمتر بودن ممان اینرسی آن نسبت به سایر ژنراتورها است که منجر به بیشترین تغییر می‌شود. (شکل ۱۷)

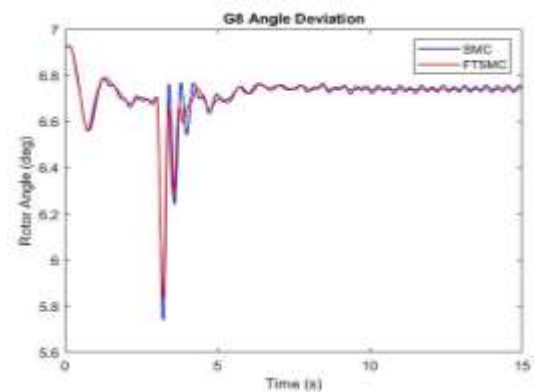


شکل ۱۷- تغییر توان مکانیکی G8

نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای و زاویه روتور به ترتیب در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است.



شکل ۱۸- تغییرات سرعت زاویه‌ای G8 پس از تغییر توان مکانیکی



شکل ۱۹- تغییرات زاویه روتور G8 بعد از تغییر توان مکانیکی

در این سیستم $x_i \in R$ متغیر حالت ($i=1, 2, 3$) و d نامعینی با حد بالای $D > 0$ است. $D(x_1, x_2, x_3)$ که معرف نامعینی‌ها و اختلالات است مفروض است که شرط $|D(x_1, x_2, x_3)| < I_d$ را برآورده می‌کند. که یک ثابت است. $f(x_1, x_2, x_2) \neq 0$ و $g(x_1, x_2, x_2) \neq 0$ توابع مشتق‌پذیر درجه سوم هستند. $u \in R$ ورودی کنترل است. سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = x_3 + k_2 |x_2|^{\gamma_2} \text{sgn}(x_2) + k_1 |x_1|^{\gamma_1} \text{sgn}(x_1) \quad (\text{A.2})$$

در معادله بالا پارامترهای k_1 و k_2 پارامترهای ثابت طراحی هستند. متغیرهای γ_1 و γ_2 بایستی شرایط زیر را برآورده کنند:

$$\begin{cases} 0 < \gamma_2 < 1 \\ \gamma_1 = \frac{\gamma_2}{2 - \gamma_2} = q/(2p - q) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

اگر هر دو متغیر p و q صحیح مثبت فرد باشند، و شرط $0.5 < \frac{q}{p} < 1$ را برآورده کنند، رابطه (A.2) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$S = x_3 + k_2 x_2^{\gamma_2} + k_1 x_1^{\gamma_1} \quad (\text{A.4})$$

هرگاه سیستم به سطح لغزش برسد، $S=0$ است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} S = x_3 + k_2 x_2^{\gamma_2} + k_1 x_1^{\gamma_1} = 0 \\ \rightarrow x_3 = -k_2 x_2^{\gamma_2} - k_1 x_1^{\gamma_1} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -k_2 x_2^{\gamma_2} - k_1 x_1^{\gamma_1} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

مطابق معادله (A.4) با انتخاب ضرایب مثبت برای k_1 و k_2 ، معادله $p^2 + k_2 p + k_1$ به یک معادله هورویتز تبدیل می‌شود. بنابراین تضمین می‌شود که نقطه تعادل پایدار است و متغیرهای حالت سیستم در یک زمان محدود همگرا می‌شوند [۲۶]. با مشتق‌گیری از رابطه (A.5) و اعمال رابطه (A.1) در آن، ورودی کنترلی به شرح زیر بدست خواهد آمد:

$$u = g^{-1}(x_1, x_2, x_3) [-f(x_1, x_2, x_3) + \text{sat}(u_f, u_s) - k \text{sgn}(s)] \quad (\text{A.7})$$

که در آن u_f به صورت زیر است:

جدول ۳- مقایسه کیفی معیارهای روش‌های کنترلی

FTSMC	SMC	خطی [۱۳]	
خوب	خوب	ضعیف	مقاوم بودن
دارد اما نسبت به SMC کمتر است	دارد	ندارد	چترینگ
بسیار سریع	سریع	کند	همگرایی
خوب و بهتر از SMC	خوب	خوب در شرایط تثبیت نقطه کار	پایداری
کوتاه	متوسط	زیاد	زمان نشست
کم	متوسط	زیاد	بالا زدگی

لازم به ذکر است که نتایج حاصله با اعمال بر روی ورودی کنترلی حاصل شده است. همچنین برای مقایسه کمی این کنترل‌کننده با سایر روش‌ها، با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که مقدار بالا زدگی روش پیشنهادی ۲۳۴ بوده در حالی که در روش SMC، ۲۷۹ می‌باشد. زمان نشست نیز نسبت به روش SMC به مقدار ۰.۷ ثانیه کاهش یافته است لذا، با توجه به نتایج حاصله، موثر بودن روش ارائه شده تایید می‌گردد.

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:

سعید اباذری: ایده مقاله، راهنمایی علمی و ویرایش تخصصی مقاله.

فرشید رئیس‌یان‌فرد: انجام شبیه‌سازی، تحلیل نتایج، نگارش پیش‌نویس مقاله.

احمد هاشمی اصفهانیان: مشاور در قسمت‌های مکانیکی روابط.

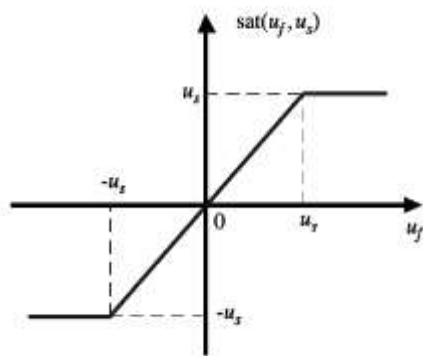
منابع مالی:

ندارد.

ضمیمه A- اثبات روش کنترلی FTSMC

یک سیستم غیرخطی مرتبه ۳ را تحت تاثیر اغتشاش d به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= f(x_1, x_2, x_3) + g(x_1, x_2, x_3)u \\ &\quad + d(x_1, x_2, x_3) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$



شکل 1.A تابع اشباع

$$u_f = -k_2 \gamma_2 x_2^{\gamma_2 - 1} x_3 - k_1 \gamma_1 x_1^{\gamma_1 - 1} x_2 \quad (A.8)$$

در معادله (A.7) تابع اشباع است که در شکل 1.A ارائه شده است. در این تابع $k = d + \eta$ می‌باشد که $\eta > 0$ ثابت طراحی است و $u_s > 0$ مقدار آستانه برای تابع اشباع است. مقدار u در رابطه (A.8) هیچ گونه نقطه تکین در شرایط تعادل سیستم ندارد.

مراجع

- [1] Xie, Bing, Zheng Li, Yunhai An, and Jingbo Zhao. "The coordinated droop control strategy for interline power flow controller." In 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 849-852. IEEE, 2022.
- [2] Thakre, Mohan, and Akbar Ahmad. "Interline power flow controller (IPFC) deployment in long transmission lines and its effects on distance relay." Journal of The Institution of Engineers (India): Series B 103, no. 2 (2022): 491-505.
- [3] Abazari, Saeed, and Mohammad Sadegh Payam. "Optimized implementation of intelligent controller based on the Lyapunov energy function of FACTS devices for improving transient stability." Journal of Modeling in Engineering 12, no. 39 (2015): 31-43. (in Persian).
- [4] Li, Jiajun, Huabo Shi, Baohong Li, Qin Jiang, Yue Yin, Yingmin Zhang, Tianqi Liu, and Chang Nie. "Fault ride-through method for interline power flow controller based on DC current limiter." Electronics 13, no. 6 (2024): 1038.
- [5] Kanchanapalli, Bhavya, Rama Rao Pokanati Veera Vekata, and Ravi Srinivas Lanka. "Analysis and Comparison of Performance of Interline Power Flow Controller with Various Control Algorithms under Various Power Stability Problems." Traitement du Signal 39, no. 5 (2022): 1605.
- [6] Kuthadi, Kiran Kumar, N. D. Sridhar, and C. H. Ravi Kumar. "Optimal Placement of IPFC Device for Enhancing Transmission System Performance Using WIPSO." Soft Computing Applications in Modern Power and Energy Systems: Select Proceedings of EPREC 2022. Singapore: Springer Nature Singapore, no.1 (2023): 1-15.
- [7] Zhang, Jun, and Akihiko Yokoyama. "Power system transient stability improvement by the interline power flow controller (IPFC)." IEEE Transactions on Power and Energy 128, no. 1 (2008): 208-215.
- [8] Kumar, Alladi Sathish, and GT Sundar Rajan. "Modelling of IPFC with multifunctional VSC for low-frequency oscillations damping and system stability improvement." International Journal of Electrical and Electronics Research 12, no. 2 (2024): 428-434.
- [9] Alshannaq, Ahmed M., Mohammed A. Haj-ahmed, Mais Aldwaik, and Dia Abualnadi. "Interline Power Flow Controller Allocation for Active Power Losses Enhancement Using Whale Optimization Algorithm." Energies 17, no. 24 (2024): 6318.
- [10] Alivelu, Alivelu, and Manga Parimi. "Modeling and control of interline power flow controller for power system stability enhancement." PhD diss., Universiti Teknologi Petronas (2011): 109.
- [11] Liu, Zhang, and Yue Yang. "Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generators in Wind Energy Applications." Renewable Energy, no. 173 (2021): 163-174.
- [12] Patel, Mohon, and Asef Rajan. "Advancements in DFIG Technology for Wind Energy Conversion Systems: A Review." IEEE Access, no. 10 (2022): 21534-21547.
- [13] Maleki Rizi, Masoud, Saeed Abazari, and Nima Mahdian Dehkordi. "Dynamic stability improvement in power system with simultaneously and coordinated control of DFIG and UPFC." Computational Intelligence in Electrical Engineering 12, no. 4 (2021): 43-56. (in Persian).

- [14] Gupta, Nerahn, and Reihna Suresh. "A New Power Flow Control Scheme Using IPFC." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2023): 340-358.
- [15] Tang, Hooi Hung, and Nur Syazreen Ahmad. "Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances." *Systems Science & Control Engineering* 12, no. 1 (2024): 2394429.
- [16] Cziker, Andrei, Anca Miron, and Horia Beleiu. "Fuzzy control systems for power quality improvement—A systematic review exploring their efficacy and efficiency." *Applied Sciences* 14, no. 11 (2024): 4468.
- [17] Chiang, Hsiao-Dong, Felix Wu, and Peon Varaiya. "Foundations of direct methods for power system transient stability analysis." *IEEE Transactions on Circuits and systems* 34, no. 2 (1987): 160-173.
- [18] Ghaedi, Sadegh, Saeed Abazari, and Gholamreza Arab Markadeh. "Transient stability improvement of power system with UPFC control by using transient energy function and sliding mode observer based on locally measurable information." *Measurement* 183 (2021): 109842.
- [19] Xi, Peng, Xiao Hu, and Yeo Li. "Backstepping-Based Control Strategy for Grid-Connected Power Converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60, no. 4 (April 2013): 1483–1491.
- [20] Faramarzi, Zabihollah, Saeed Abazari, Saeed Houghghi, and Navid Reza Abjadi. "Improved Power System Dynamic Stability by DFIG in the Presence of SSSC Using Adaptive Nonlinear Multi-Input Backstepping." *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 12, no. 2 (2024): 107-120.
- [21] Abazari, Saeed, and Zabihollah Faramarzi, "Damping Improvement of Multi Machine Power System Oscillations by using UPFC Controller based Multi-input Nonlinear Backstepping Controller." *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, vol. 50, no. 3 (2020): 977-991. (in Persian).
- [22] Elkington, Katherine, Valerijs Knazkins, and Mehrdad Ghandhari. "On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation." *Electric Power Systems Research* 78, no. 9 (2008): 1477-1484.
- [23] Gyugyi, Laszlo, Theon Rietman, Ahmed Edris. "The Unified Power Flow Controller: a new approach to power transmission control." *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 13, no. 2 (1998): 630-639.
- [24] Darly, Sellin, Vanaja Ranjan, and Romah Justus. "Modeling, Simulation and Fault Diagnosis of IPFC using PEMFC for High Power Applications." *J Electr Eng Technol*, Vol. 8, no. 4, (2013): 760-765.
- [25] Kamel, Salah, Mohamed Abokrishah, Ali Selim, and Francisco Jurado. "Power flow control of power systems based on a simple TCSC model." *Ain Shams Engineering Journal* 12, no. 3 (2021): 2781-2788.
- [26] Feng, Yong, Xinghuo Yu, and Fengling Han. "On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems." *Automatica* 49, no. 6 (2013): 1715-1722.