



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

"Improving Power System Stability in the Presence of IPFC and DFIG"

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

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

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

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

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

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/>

© 2024 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:

بهبود پایداری سیستم قدرت در حضور IPFC و DFIG

سعید اباذری^{۱*}، فرشید رئیسیان فرد^۲، احمد هاشمی اصفهانیان^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵	در این مقاله، به بهبود پایداری سیستم قدرت در حضور کنترل کننده جریان توان بین خطی و ژنراتور القایی دوستغذیه پرداخته شده است. روش کنترلی به کاررفته مبتنی بر کنترل حالت لغزشی زمان محدود است که قابلیت بالایی در مقابله با تغییرات پارامتری سیستم در قیاس با روش های 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 می نماید. این روش کنترلی بر روی ژنراتور القایی دوستغذیه، ژنراتورهای سنکرون و کنترل کننده جریان توان بین خطی با رعایت محدودیت ها پیاده سازی 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 مقاوم تر می باشد. برای ارزیابی کارایی این روش، از شبکه ۳۹ باسه NEW ENGLAND استفاده شده که نتایج شبیه سازی تاثیر این کنترل کننده را با رعایت محدودیت ها در جهت بهبود پایداری نشان می دهد.
واژگان کلیدی: ژنراتور سنکرون، DFIG، IPFC، کنترل حالت لغزشی، کنترل حالت لغزشی زمان محدود	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 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^۱

امروزه با افزایش تعداد مصرف کنندگان و تقاضای رو به رشد انرژی، نیاز به بهره برداری از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال بیش از پیش احساس می شود [۱]. به دلیل محدودیت های فیزیکی، اقتصادی و محیطی، احداث خطوط جدید اغلب امکان پذیر نیست و علاوه بر این، محدودیت های عایقی، حرارتی و پایداری نیز مانعی برای بهره برداری از ظرفیت

کامل خطوط فعلی به شمار می روند [۲ و ۳]. از این رو، 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 انعطاف پذیر AC (FACTS) به عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه سازی توزیع توان و افزایش انعطاف پذیری و پایداری سیستم های قدرت مطرح شده

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

۱. دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد

۳. استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

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 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) به طور همزمان بر روی DFIG، 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

است [۴]. یکی از این تجهیزات، کنترل‌کننده جریان توان بین‌خطی (IPFC)^۳ 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 بهبود پایداری می‌گردد [۸]. به‌علاوه، 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 دوسوتغذیه (DFIG)^۴، ژنراتور سنکرون مغناطیس‌دائم (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 کنترل‌پذیری 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

³ Interline Power Flow Controller

⁴ Doubly Fed Induction Genaretor

⁵ Permanent Magnet Synchronous Generator

⁶ Finite Time Sliding Mode Control

⁷ Sliding Mode Control

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

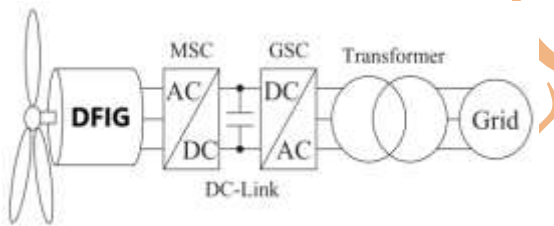
روش کنترلی، و نهایتاً ارائه نتایج شبیه‌سازی می‌باشد. متغیرهای استفاده شده در فرمول‌ها و روابط ریاضی در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۱: متغیرهای به کار رفته در مقاله

نشانه	توضیح
δ_i	زاویه روتور ژنراتور i-ام
ω_i	سرعت روتور ژنراتور i-ام
$\dot{E}_{qi}$	ولتاژ داخلی ژنراتور i-ام در محور q
$\dot{E}_i$	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
$\hat{T}_{doi}$	ثابت زمانی سیم‌پیچ تحریک ژنراتور i-ام
x_{di}	راکتانس محور d ژنراتور i-ام در حالت ماندگار
$\dot{x}_{di}$	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
$\dot{X}_i$	راکتانس معادل DFIG در حالت گذرا

۲-۲-۲ مدل DFIG

DFIG دارای دو کانورتر الکترونیک قدرت به نام‌های RSC^۸ و GSC^۹ است. شایان ذکر است که در اینجا بهیود پایداری در سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته و تأثیر اصلی را بر پایداری دارد؛ بنابراین، در مدل ارائه شده، ورودی‌های RSC و 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 مدل‌سازی 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]:



شکل ۱: شمای کلی DFIG متصل به شبکه

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

۲-۲-۱ 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.

۲-۱-۲ 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.

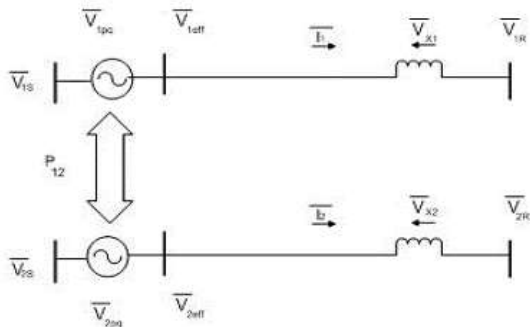
برای ژنراتور i-ام و $i = 1, 2, \dots, n$:

⁸ Rotor-Side Converter

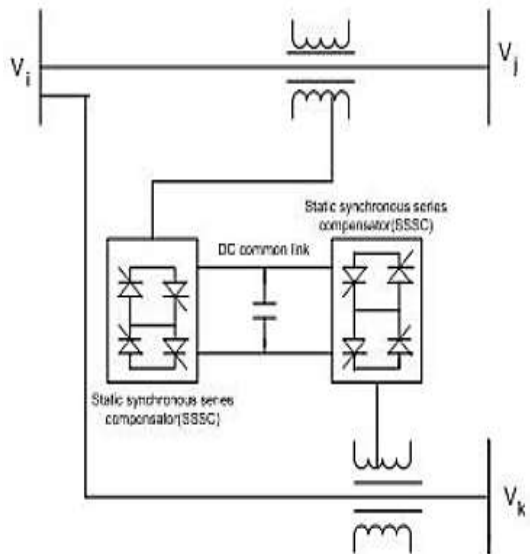
⁹ Grid-Side Converter

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

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



شکل ۲: طرح پایه IPFC



شکل ۳: شماتیک مدل ساده شده 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 حالت معادلات جبری تعادل توان همه باس‌هایی که به ژنراتورها متصلند، باس‌های متصل به DFIC و IPFC به صورت زیر است [۲۵]:

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:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{0i} \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{2H_i} \left[P_m \frac{\omega_s}{\omega_i} - \frac{\dot{E}_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{X_i} \right] \\ \dot{E}_i = f_{di}(x) + g_{d1i}(x) u_{df1i} + g_{d2i}(x) u_{df2i} \end{cases} \quad (۳)$$

$$\begin{cases} \omega_{0i} = \omega_s + \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{E}_i T_{0i} \dot{X}_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\ - \frac{\omega_s}{\dot{E}_i} (u_{df1i} \cos(\delta_i) + u_{df2i} \sin(\delta_i)) \\ f_{di}(x) = \frac{1}{T_{0i}} \left[-\frac{X_i}{\dot{X}_i} \dot{E}_i + \frac{X_i - \dot{X}_i}{\dot{X}_i} V_i \cos(\delta_i - \theta) \right] \\ g_{d1i}(x) = \omega_s \sin(\delta_i) \\ g_{d2i}(x) = \omega_s \cos(\delta_i) \end{cases} \quad (۴)$$

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

۲-۳- مدل سازی IPFC

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 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].

¹⁰ Static Synchronous Series Compensator

که در آن $[D'] = \frac{1}{T_{doi}}[D]$ و $[K'] = \frac{1}{L}[K]$ می‌باشد. ورودی کنترلی ژنراتورهای سنکرون، u_{qk} و ورودی کنترلی DFIG و u_s و ورودی کنترلی مربوط به SSSCها (IPFC) است. با حل معادله (۱۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = [A][H] + [B][s_k] + [A'][E_{fi}] + [B'][u_{qk}] + [G][u_s] \quad (۱۲)$$

که در این رابطه

$$\begin{aligned} [A] &= -[C]^{-1}[D], & [B] &= -[C]^{-1}[K] \\ [G] &= -[C]^{-1}[F], & [H] &= \begin{bmatrix} h_i \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

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

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - P_{ei}] \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{doi}} \left(-\frac{X_{di}}{X'_{di}} E'_{qi} + \frac{X_{di} - X'_{di}}{X'_{di}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + E_{fi} \right) \\ P_{ei} = \frac{1}{X'_{di}} E'_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{X'_{di} - X_{di}}{2X'_{di} X_{qi}} V_i^2 \sin(2(\delta_i - \theta_i)) \end{cases} \quad (۱۴)$$

$$\begin{cases} \dot{\delta}_k = \omega_k - \omega_0 \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k} (T_{Lk} - T_{ek}) \\ \dot{i}_{qk} = \frac{R_k}{L_k} i_{qk} - \frac{1}{L} u_{qk} + \frac{p_{nk} \psi_{fk}}{L_k} \omega_k \\ T_{ek} = \frac{3}{2} p_{nk} \psi_{fk} i_{qk} \end{cases} \quad (۱۵)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} H_j + \sum_{j=1}^N b_{ij} S_j + \sum_{j=1}^N a'_{ij} E_{fij} + \sum_{j=1}^N b'_{ij} u_{qij} + \sum_{j=1}^N g_{ij} u_{sij} \\ \dot{\theta}_i = \sum_{j=1}^N a_{i+N,j} H_j + \sum_{j=1}^N b_{i+N,j} S_j + \sum_{j=1}^N a'_{i+N,j} E_{fij} + \sum_{j=1}^N b'_{i+N,j} u_{qij} + \sum_{j=1}^N g_{i+N,j} u_{sij} \end{cases} \quad (۱۶)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{cases} h_i = \frac{1}{T'_{doi}} (-E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}) \\ \dot{E}'_{qi} = h_i + \frac{1}{T'_{doi}} E_{fi} \end{cases} \quad (۹)$$

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

$$\begin{cases} s_k = \frac{R_k}{L_k} i_{qk} + \frac{p_{nk} \psi_{fk}}{L_k} \omega_k \\ \dot{i}_{qk} = s_k - \frac{1}{L} u_{qk} \end{cases} \quad (۱۰)$$

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

$$[C] \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = -[D] \begin{bmatrix} h_i \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} - [K] [s_k] - [D'] [E'_{fi}] - [K'] [u_{qk}] - [F] [u_s] \quad (۱۱)$$

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 آیین 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.

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

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:

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

$$\dot{s}_i = K_{1i}e_{2i} + K_{2i}e_{3i} + f_i(x) \quad (21)$$

$$+ \sum_{j=1}^n g_{sij} u_{fj} + \sum_{j=1}^3 g_{Rij} R_j$$

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

$$\dot{s} = K_1 e_2 + K_2 e_3 + F(x) + G_s U_f + G_R R \quad (22)$$

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

$$U_{feq} = G_s^{-1}(-K_1 e_2 - K_2 e_3 - F(x) - G_R R) \quad (23)$$

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

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

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 سریع تر 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 آن چه برای SMC معمولی انجام شد قانون کنترلی زیر به دست خواهد آمد:

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

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

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

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

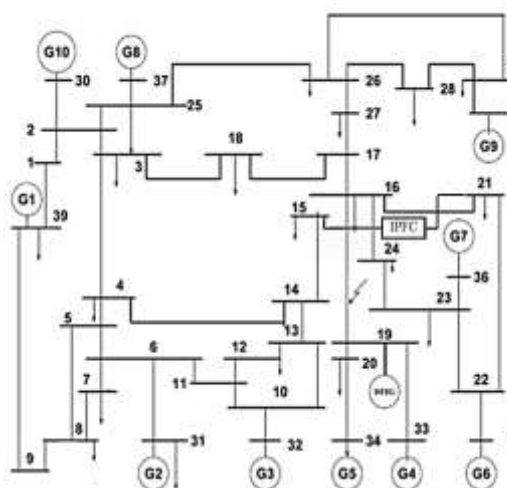
^{۱۱} Sliding Mode Control

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 پایداری سازی کل سیستم قدرت در شرایط مختلف عملیاتی، یک شبیه‌سازی زمانی انجام می‌شود. سیستم قدرت در نظر گرفته‌شده، شبکه استاندارد ۳۹ باسه NEW ENGLAND فرض شده است. شکل ۵ نمودار تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. در این سیستم، یک DFIG در باس ۱۹ اضافه گردیده و یک المان IPFC بین باس‌های شماره ۱۵ و ۲۱ قرار داده شده‌است. دلیل استفاده از IPFC در این محل، بیشترین افت ولتاژ در این باس‌ها بعد از وقوع یک خطای اتصال کوتاه است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، 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 ۵: شبکه ۳۹-باسبه NEW ENGLAND شامل IPFC و DFIG

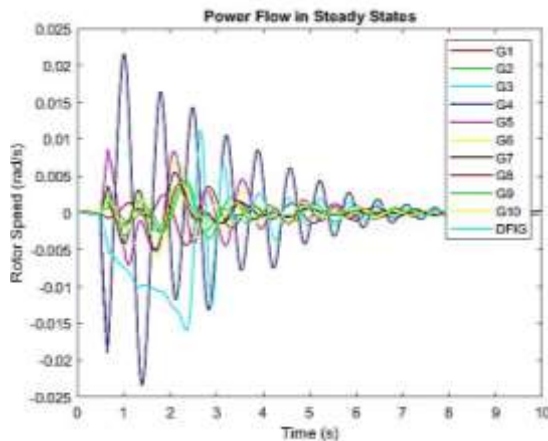
در زمان 500 msec یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت 150 msec در نزدیکی ژنراتور ۴ اعمال می‌شود. پارامترهای FTSMC برای این شبیه‌سازی $\gamma_{2i} = 3.5$ و K_{1i} و K_{2i} برابر 0.7 انتخاب شده‌اند.

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 n-بعدی در ضمیمه A آمده است.

در فلوچارت زیر، پیکربندی کلی برای کنترل سیستم قدرت در حضور DFIG و IPFC نشان داده شده است.



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



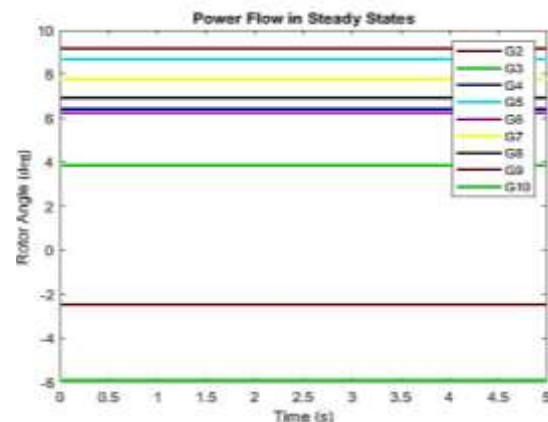
شکل ۸: تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور حین خطا و در حضور DFIG بدون IPFC

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

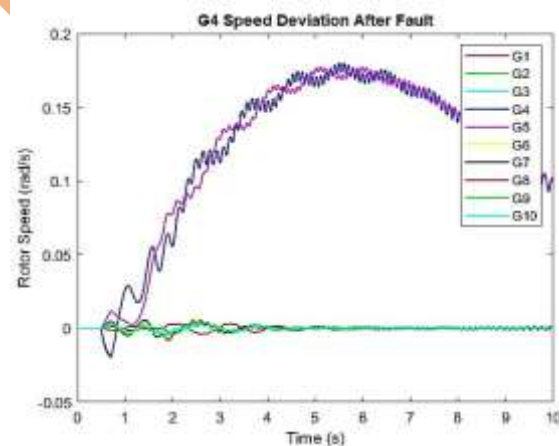
در ابتدا به بررسی کنترل‌کننده نوسانات توان (POD)^{۱۲} که کنترل‌کننده‌ای است که برای کاهش نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت به کار می‌رود و یک کنترلر مرسوم جهت FACTS به شمار می‌رود. از این رو در مرحله اول، این کنترلر را جهت استفاده برای کنترل IPFC در شبکه مدنظر به کار برده می‌شود. در ادامه رفتار این کنترل کننده را با کنترل کننده‌های غیرخطی پیشنهادی (SMC و FTSMC) اعمال شده مقایسه شده است.

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 DFIG و IPFC

سپس همان طور 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.

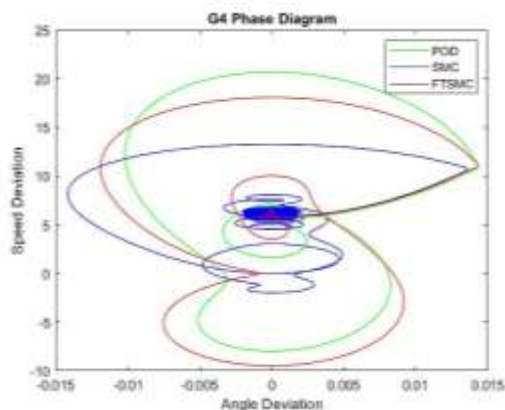


شکل ۷: تغییرات سرعت روتور بدون حضور DFIG و IPFC

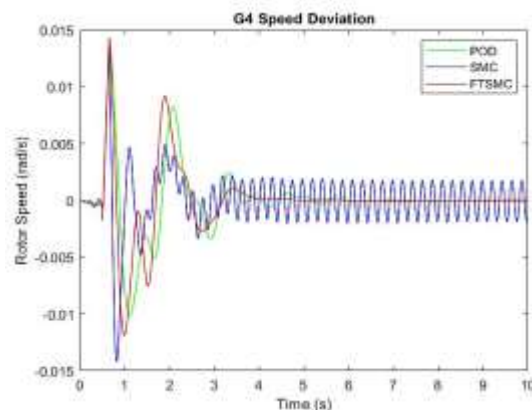
همان طور که در شکل ۷ مشخص است ژنراتور G4 ناپایدار می‌گردد.

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

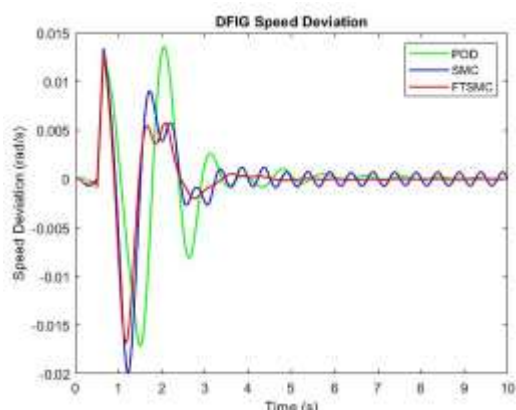
¹² Power Oscillation Damping



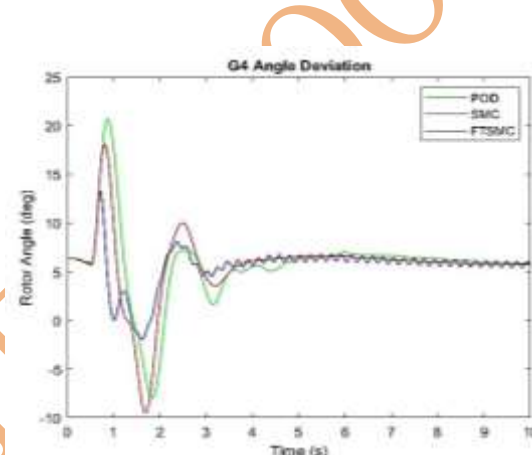
شکل ۱۱: دیاگرام فاز G4



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

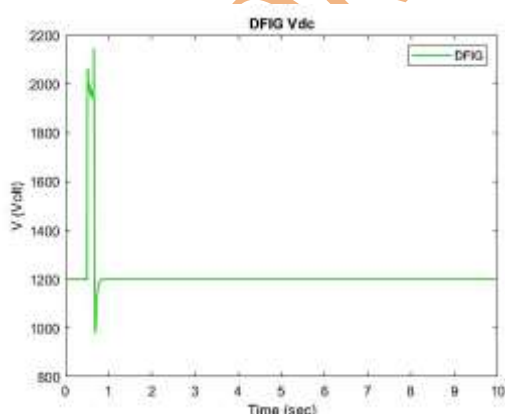


شکل ۱۲: تغییرات سرعت زاویه‌ای DFIG



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

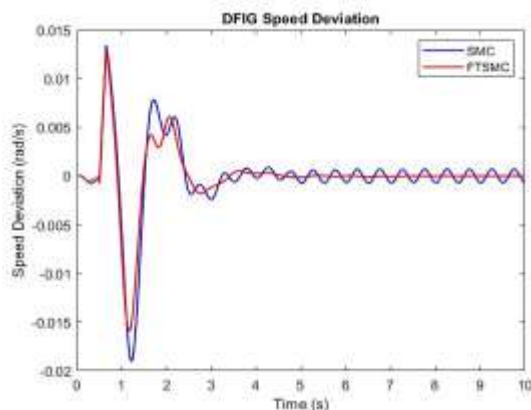
در شکل ۱۳ تغییرات ولتاژ خازن لینک dc در کانورتر سمت شبکه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترلر توانسته مقدار خازن را به مقادیر قبل از خطا برساند.



شکل ۱۳: تغییرات Vdc در DFIG

در شکل‌های ۹ و ۱۰ رفتار تغییرات سرعت زاویه‌ای و زاویه روتور ژنراتور G4 با کنترل‌کننده‌های 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 روش‌های گفته شده بر اساس دیاگرام فاز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

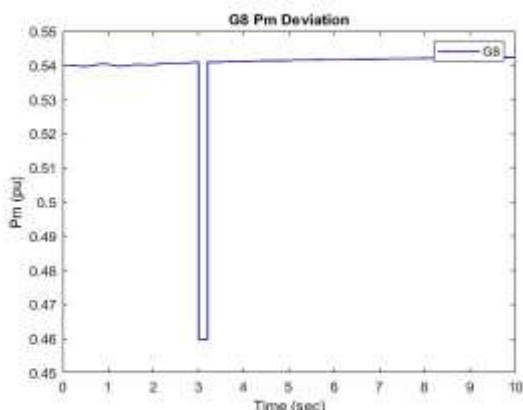
در ادامه به بررسی مقاوم بودن این کنترل‌کننده (FTSMC) پرداخته شده است.



شکل ۱۶: تغییرات زاویه روتور DFIG بعد از خروج خط

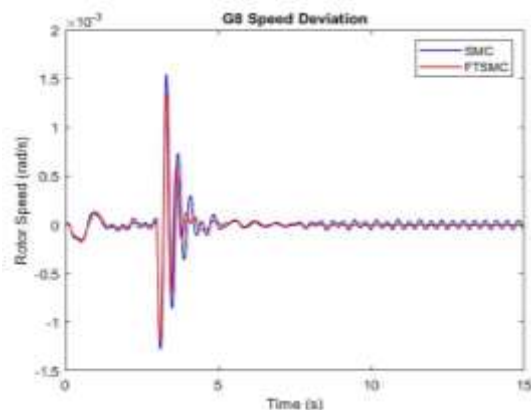
۳-۳-۲- تغییر ناگهانی در توان مکانیکی ژنراتور

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: تغییر توان مکانیکی G8

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



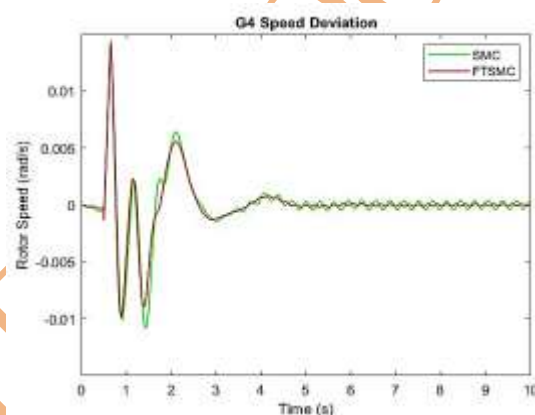
شکل ۱۸: تغییرات سرعت زاویه‌ای G8 پس از تغییر توان مکانیکی

۳-۳-۳- بررسی مقاوم بودن روش کنترلی در مقابل

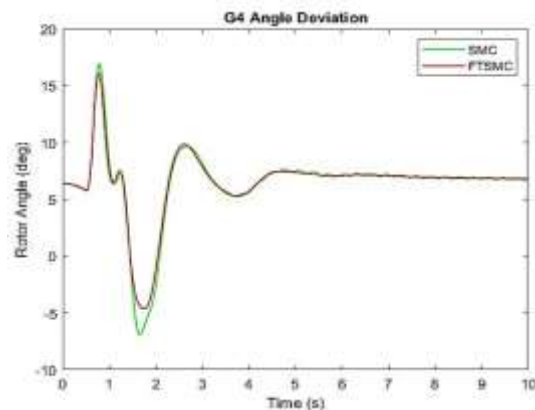
تغییر پارامترها و توپولوژی سیستم

۳-۳-۳-۱- خروج خط

برای مطالعه مقاوم بودن این کنترل‌کننده، 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 می‌شود. در حقیقت توپولوژی سیستم تغییر نموده و انتظار می‌رود که کنترل‌کننده پیشنهادی بتواند سیستم را در نقطه تعادل جدید پایدار نماید. این موضوع، در شکل‌های 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

۴- نتیجه گیری

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 شبیه سازی و معیارهای کنترلی بررسی شده در جدول ۲، کارایی روش پیشنهادی را نسبت به روش کنترل غیرخطی SMC و روش خطی POD نشان می دهد. همچنین نشان داده شد که این کنترل کننده نسبت به تغییر پارامترها، تغییر توپولوژی سیستم، تغییر زمان اختلال و محل اختلال مقاوم می باشد. مقایسه کیفی روش ارائه شده با روش خطی ارائه شده در مرجع [۱۳] در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج حاصله با اعمال بر روی ورودی کنترلی حاصل شده است. همچنین برای مقایسه کمی این کنترل کننده با سایر روش ها، با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که مقدار بالازدگی روش پیشنهادی ۲۳۴ بوده در حالی که در روش SMC، ۲۷۹ می باشد. زمان نشست نسبت به روش SMC به مقدار ۰.۷ ثانیه کاهش یافته است لذا، با توجه به نتایج حاصله، موثر بودن روش ارائه شده تایید می گردد.

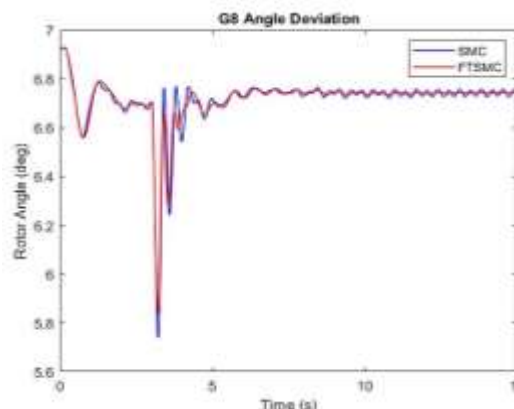
جدول ۳: مقایسه کیفی معیارهای روش های کنترلی

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	بالازدگی

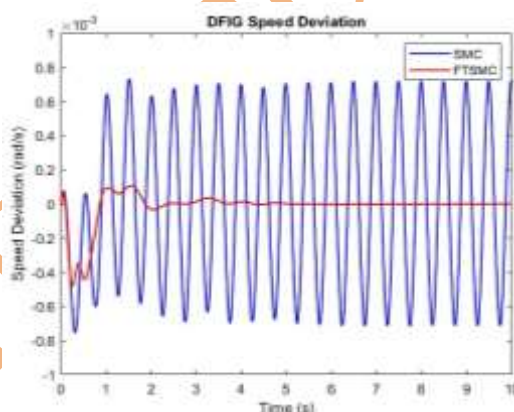
ضمیمه A- اثبات روش کنترلی FTSMC

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

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



شکل ۱۹: تغییرات زاویه روتور G8 بعد از تغییر توان مکانیکی همچنین تغییرات سرعت زاویه ای DFIG نیز در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



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

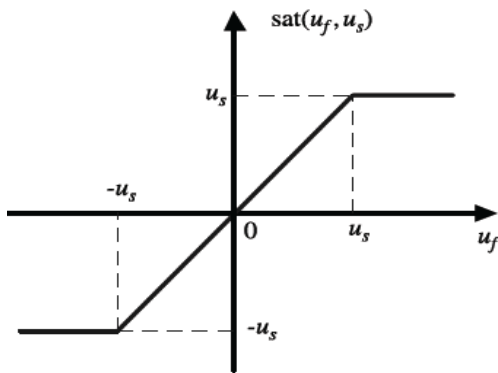
با توجه به بررسی های انجام شده، خلاصه نتایج معیارهای کنترلی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: معیارهای کنترلی برای سرعت زاویه ای روتور

FTSMC		SMC		
بالازدگی	زمان نشست	بالازدگی	زمان نشست	
(درصد)	(sec)	(درصد)	(sec)	
بروز خطا در باس ۱۹				
۲۳۴	۳.۵	۲۷۹	۴.۲	G4
۲۶۹	۳.۲	۲۸۱	۳.۸	DFIG
خروج خط مابین باس های 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

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

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



شکل 1.A تابع اشباع

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

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

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:

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

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

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

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

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

که نتیجه می دهد:

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

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

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

که در آن u_f به صورت زیر است:

مراجع

- [1] Z. Cui, L. Ming, G. Jian, and Z. Yi. "The Coordinated Droop Control Strategy for Interline Power Flow Controller." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (2023): 1-18.
- [2] H. Li, and X. Zhang. "Interline Power Flow Controller (IPFC) Deployment in Long Transmission Lines." *Springer Power Systems Series*, (2023): 150-168.
- [۳] اباذری، سعید، و محمدصادق پیام. "پیاده‌سازی کنترلر بهینه هوشمند بر مبنای تابع انرژی لیاپانوف عناصر موازی FACTS جهت بهبود پایداری گذرا." نشریه مدل‌سازی در مهندسی، ۱۲، ۳۹ (۱۳۹۳): ۳۱-۴۳.
- [4] Y. Xu, and J. Lin. "Fault Ride-Through Method for IPFC Based on DC Current Limiter." *Energies* 16, no. 11 (2023): 4567-4578.
- [5] S. Qiu, and Z. Wei. "Analysis and Comparison of Performance of IPFC with Various Control Algorithms." *IJETA*, (2023): 900-913.
- [6] M. Ali, F. Alotaibi, and A. Rashid. "Optimal Placement of IPFC Device for Enhancing Transmission System Stability." *Springer*, (2023): 310-325.
- [7] J. Zhang, and A. Yokoyama. "Power system transient stability improvement by the interline power flow controller (IPFC)." *IEEJ Transactions on Power and Energy* 128, no. 1 (2008): 208-215.
- [8] A.S. Kumar, and G.T. 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] A. Alshannaq, M. Mohammed, A. Haj-ahmed, M. Aldwaik, and D. Abualnadi. "Interline Power Flow Controller Allocation for Active Power Losses Enhancement Using Whale Optimization Algorithm." *Energies* 17, no. 24 (2024): 6318.
- [10] P. Dutta, and C. Balam. "Modeling and Simulation of IPFC for Steady State Power Flow Improvement." *IEEE Xplore*, (2023): 105-118.
- [11] Z. Liu, and Y. Yang. "Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generators in Wind Energy Applications." *Renewable Energy*, no. 173 (2021): 163-174.
- [12] M. Patel, and A. Rajan. "Advancements in DFIG Technology for Wind Energy Conversion Systems: A Review." *IEEE Access*, no. 10 (2022): 21534-21547.
- [۱۳] ملکی ریزی، مسعود، سعید اباذری، و نیما مهدیان. "بهبود پایداری دینامیکی در سیستم قدرت با کنترل هماهنگ و همزمان کنترل کننده یکپارچه توان و ژنراتور القایی دو سو تغذیه." هوش محاسباتی در مهندسی برق، ۱۲، ۴ (۱۴۰۰): ۴۳-۵۶.
- [14] N. Gupta, and R. Suresh. "A New Power Flow Control Scheme Using IPFC." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2023): 340-358.
- [15] H. Tang, and N. 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] A. Cziker, and H. Beleiu. "Fuzzy Control Systems for Power Quality Improvement—A Systematic Review Exploring Their Efficacy and Efficiency." *Applied Sciences* 14, no. 11 (2024): 4468
- [17] C. Hsiao-Dong, F. Wu, and P. Varaiya. "Foundations of direct methods for power system transient stability analysis." *IEEE Transactions on Circuits and systems* 34, no. 2 (1987): 160-173.
- [18] S. Ghaedi, S. Abazari, and G. 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*, vol. 183 (2021): 109842.
- [19] P. Xi, X. Hu, and Y. Li. "Backstepping-Based Control Strategy for Grid-Connected Power Converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60, no. 4 (April 2013): 1483-1491.
- [20] Z. Framarzi, S. Abazari, S. Hoghooghi, and N. 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* (2022): 107-120.

- [21] S. Abazari, Z. 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] K. Elkington, K. Knazkins, M. Ghandhari. "On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation." *Elsevier, Electric Power Systems*.(2008).
- [23] L. Gyugyi, T. Rietman, A. 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] S. Darly, and P. Vanaja-Ranjan, and R. 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] S. Kamel, and A. Selim, and F. Jurado, "Power flow control of power systems based on a simple TCSC model", *Ain Shams Engineering Journal*. (2021).
- [26] Feng, Y., X. Yub, and F. Han. "On Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Nonlinear Systems." *Automatica*, (2013): 01-51.

UNCORRECTED PROOF