

طراحی بهینه میراساز ناحیه گسترده مبتنی بر توربین بادی و پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع سالپ



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.7.1](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.7.1)

نشریه علمی پژوهشی در مهندسی برق

دوره ۷ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۳۹۹

صفحات ۱۳۰ الی ۱۵۹

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

پیام رکنی نخی^۱ و مهرداد احمدی کمرپشتی^۲

^۱ گروه مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، payamrokni@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، گروه مهندسی برق، واحد جویبار، دانشگاه آزاد اسلامی، جویبار، ایران،
mehرداد.ahmadi.k@gmail.com, m.ahmadi@jouybariau.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

در این مقاله برای حفظ پایداری سیستم‌های قدرت و میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای، میراساز مبتنی بر توربین بادی و پایدارساز سیستم قدرت به صورت بهینه و هماهنگ ارائه شده است. طراحی بهینه و هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت (PSS) نصب شده در ژنراتور و میراساز نصب شده در بخش کنترلی توربین بادی از دو سو تغذیه (DFIG) به صورت یک مساله بهینه سازی تعریف شده و شبیه سازی‌ها در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است. برای تعیین بهینه ضرایب پایدارساز و میراساز از روش فراابتکاری اجتماع سالپ (SSA) با تابع هدف حداقل کردن خطای ناشی از تغییرات فرکانس دو ناحیه استفاده شده است. در این میراساز پیشنهادی به دلیل استفاده از سیگنال‌های سراسری (WAMS) جهت افزایش کنترل پذیری و مشاهده پذیری بیشتر مودهای نوسانی و تاخیر زمانی ناشی از این سیگنال‌ها نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این عدم قطعیت موجود در میزان باد و تاخیر زمانی موجود در سیگنال‌های سراسری به صورت احتمالی محاسبه شده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای شش ماشینه به همراه مزرعه بادی اعمال شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی حاکی از عملکرد بهتر و پایداری سیستم قدرت با استفاده از روش پیشنهادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

نوسانات بین ناحیه‌ای،

پایدارساز سیستم قدرت،

توربین بادی از دو سو تغذیه،

سیگنال‌های سراسری،

عدم قطعیت،

تأخیر زمانی.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.7.1](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.7.1)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.7, No.7

Autumn and Winter 2020

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Optimal Design of Wide-Area Power Oscillation Damper Based on DFIG and PSS Using Salp Swarm Optimization

Payam Rokni Nakhi¹ and Mehrdad Ahmadi Kamarposhti²

¹ Department of Electrical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran, payamrokni@yahoo.com

² **Corresponding Author**, Department of Electrical Engineering, Jouybar Branch, Islamic Azad University, Jouybar, Iran, mehrdad.ahmadi.k@gmail.com, m.ahmadi@jouybariau.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Inter-area oscillations,
power system stabilizer,
doubly-fed induction
generator,
wide-area measurement
system,
uncertainty,
time delay.

The paper presents an optimal and coordinated power oscillation damper based on a wind turbine and power system stabilizer (PSS) to maintain the power system stability and damp inter-area oscillations. The optimal and coordinated design of the PSS located at the generator site and the damper which was installed in the control section of the doubly-fed induction generator (DFIG) is defined as an optimization problem and simulations have been performed in MATLAB software environment. To determine optimal coefficients of the PSS and damper, the metaheuristic salp swarm optimization (SSA) algorithm was employed with an objective function that aimed to minimize the error caused by frequency deviations of two areas. Due to the use of wide-area measurement systems (WAMS) in the proposed damper to enhance controllability and observability of most of the oscillation modes, time delays resultant from the WAMS was also taken into account. Additionally, uncertainties of wind intermittency and time delay of WAMS were calculated probabilistically. The suggested method was applied to a six-machine two-area power system with a wind farm. The obtained simulation results highlighted and validated the superior performance and stability of the power system as a result of using the proposed method.

علائم و اختصارات

PSS	پایدارساز سیستم قدرت
FACTS	سیستم های انتقال انعطاف پذیر متناوب
WAMS	سیستم های اندازه گیری ناحیه گسترده
PMU	واحد اندازه گیری فازور
SDC	کنترل کننده میراساز کمکی
WADC	کنترل کننده میراساز ناحیه گسترده
SVC	جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو
DFIG	ژنراتور القایی دو سو تغذیه
HVDC	ولتاژ مستقیم فشار قوی
SSSC	جبران‌ساز استاتیک سنکرون سری
STATCOM	جبران‌ساز استاتیکی
CDC	کنترل کننده معمولی
LFO	نوسانات فرکانس پایین
AVR	تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ
FLDC	کنترل کننده منطق فازی
SSR	تشدید زیر سنکرون
τ'_{d0}, τ'_{q0}	ثابت زمانی گذرای محور d و q
E'_d, E'_q	EMF استاتور مربوط به مؤلفه گذرای شار روتور
E_{fd}	EMF استاتور مربوط به ولتاژ میدان d و q
X_d, X_q	راکتانس سنکرون محور d و q
X'_d, X'_q	راکتانس گذرای محور d و q
I_d, I_q	جریان محور d و q استاتور
P_e	توان الکتریکی خروجی ژنراتور سنکرون
D	ضریب میرایی

۱- مقدمه

امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت روز به روز در حال افزایش است. انرژی باد یکی از انواع منابع انرژی تجدیدپذیر است که با توجه به ویژگی‌های آن بصورت گسترده با تمرکز کم (چگالی کم) در اختیار بشر قرار گرفته است [۱]. با افزایش بکارگیری این منابع در سیستم‌های قدرت، بایستی میزان تاثیر آن‌ها بر پایداری دینامیکی سیستم قدرت مورد ارزیابی قرار گیرد. به دلیل آنکه توان سیستم‌های بادی وابسته به سرعت باد بوده و سرعت باد می‌باشد ماهیتی تصادفی دارد. به واسطه تغییرات دائمی باد و در نتیجه تغییرات توان تولیدی توسط مزارع بادی، عدم قطعیت در توان بخش لاینفکی از سیستم قدرت خواهد شد. حال اگر، نفوذپذیری این منابع افزایش یابد، می‌توانند بطور مستقیم در پایداری دینامیکی سیستم تاثیرگذار باشند و حاشیه پایداری سیستم تغییر خواهد یافت [۲]، [۳]. علاوه بر این، گسترش مصرف‌کننده‌های انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت باعث افزایش که سطح انرژی انتقالی در سیستم شده و سیستم قدرت تبدیل به شبکه عظیم و پیچیده‌ای شده است. این موضوع باعث شده که سیستم در نقاط کاری آستانه و نهایی خود عمل کند، لذا حاشیه پایداری کاهش یافته و خطوط انتقال در حداکثر ظرفیت خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که می‌توان نتیجه گرفت هرگونه اتفاق ناخواسته از جمله خطای رخ داده بر روی خط و یا خروج یک خط می‌تواند به راحتی نوسانات دینامیکی بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی را در سیستم به وجود آورد [۴]. این نوسانات گذرا می‌توانند به‌عنوان یک عامل مخرب در سیستم قدرت عمل کرده و همچنین باعث ناپایداری در سیستم قدرت شود [۵].

ناپایداری‌های دینامیکی سیستم قدرت که ناشی از عدم تعادل بین توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی خروجی و کمبود گشتاور میراکننده است، باعث ایجاد نوسانات محلی^۱ و بین ناحیه‌ای^۲ در سیستم قدرت می‌گردد [۶]. فرکانس این نوسانات در محدوده ۰/۲-۲ هرتز می‌باشد. نوساناتی که وابسته به یک ژنراتور تنها یا یک نیروگاه تنها در مقابل سیستم قدرت باشد، نوسانات محلی می‌گویند و در محدوده فرکانسی ۰/۸-۲ هرتز نوسان دارند. نوسانات بین ناحیه‌ای با محدوده فرکانسی ۰/۸-۰/۲ هرتز، زمانی که ژنراتورهای یک ناحیه در مقابل ژنراتورهای ناحیه دیگر نوسان می‌کنند پدید می‌آیند. نوسانات بین ناحیه‌ای به خاطر این که دارای میرایی ضعیفی می‌باشند، پایداری سیستم قدرت را بیشتر تهدید می‌کنند [۷].

به منظور میراسازی نوسانات مذکور در سیستم قدرت بیشتر از پایدارساز سیستم قدرت^۳ (PSS)، میراسازهای نصب شده در ادوات^۴ FACTS و بخش کنترلی منابع تجدیدپذیر با نفوذ بالا استفاده می‌شود [۸]. ولی میراسازی این نوسانات با روش‌های ذکر شده اکثراً به دلیل استفاده از سیگنال‌های محلی به عنوان سیگنال ورودی PSSها و میراسازها، اغلب فاقد مشاهده‌پذیری^۵ و کنترل‌پذیری^۶ خوب برخی از مدهای بین ناحیه‌ای بوده و باعث میرایی کم در سیستم قدرت می‌شوند [۹]. استفاده از سیگنال راه دور برای ورودی کنترل‌کننده باعث افزایش کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری مدهای بین ناحیه‌ای شده و عملکرد دینامیکی سیستم را در

¹ Local oscillations

² Inter-area oscillations

³ Power system stabilizer

⁴ Flexible AC transmission system

⁵ Observability

⁶ Controllability

مقایسه با سیگنال‌های محلی اندازه‌گیری شده، افزایش می‌دهد [۱۰]. امروزه سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده^۱ (WAMS)، با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور^۲ (PMUs)، که قادر به نظارت بر داده‌های دینامیکی سیستم قدرت مانند ولتاژ، جریان، زاویه، و فرکانس است، به‌طور وسیع گسترش یافته است. از این‌رو، فرصت خوبی در فضای مشاهده‌پذیری برای کنترل دینامیکی سیستم قدرت با استفاده از داده‌های WAMS ایجاد شده است [۱۱]. میراساز ناحیه گسترده از اندازه‌گیری‌های گسترده WAMS برای ایجاد سیگنال‌های کنترلی میراساز کمکی^۳ (SDC) به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی میراساز ناحیه گسترده^۴ (WADC) استفاده نموده، میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای [۱۲]. اگرچه استفاده از WAMS برای کنترل‌کننده‌های میراساز، پتانسیل زیادی در بهبود میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای دارند، اما استفاده از سیگنال‌های راه دور چالش جدیدی را برای طراحی کنترل‌کننده‌های میراساز به وجود می‌آورد، زیرا تأخیرهای زمانی به وجود آمده در اثر شبکه‌های مخابراتی برای انتقال سیگنال راه دور باعث کاهش عملکرد میرایی یا حتی باعث ناپایداری سیستم حلقه بسته می‌شود [۱۳]، [۱۴]. تأخیر زمانی ناشی از انتقال سیگنال‌های راه دور یکی از فاکتورهای کلیدی و مؤثر در پایداری کل سیستم و عملکرد میراسازی می‌باشد [۱۰].

نقش مثبت ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) در میرایی نوسانات توان تولیدی در مقالات متعدد در زمینه سیستم قدرت نشان داده شده است [۱۵]–[۱۷]. در مرجع [۳] طراحی بهینه کنترل‌کننده میرایی نوسانات (OODC^۵) مبتنی بر مدل کاهش یافته را برای توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG ارائه می‌دهد. در مرجع [۴]، افت اطلاعات و تأخیرهای زمانی وارد شده در شبکه ارتباطی باعث کاهش عملکرد میرایی میراسازهای نوسان‌توان ناحیه گسترده (WPOD^۶) می‌شود، حتی ممکن است باعث ناپایداری سیستم حلقه بسته شود. در این مقاله یک مدل انتقال داده در سیستم کنترل شبکه (NCS^۷) ایجاد شده و یک WPOD مبتنی بر کنترل پیش‌بین شبکه‌ای (NPC) نیروگاه بادی مبتنی بر DFIG برای میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. مراجع [۱۸]–[۲۲] توانایی DFIG در میرایی نوسانات درون ناحیه را با تکمیل یک کنترل نوسانات کمکی به حلقه کنترل اصلی DFIG آزموده‌اند. در مرجع [۲۲] یک رویکرد کنترل نوسانات یا هدف کاهش رزونانس زیرسکروون با DFIG ارائه شده است. با توجه به این واقعیت که ادوات FACTS و پیوند HVDC معمولاً در مناطق مرکزی سیستم‌های قدرت دارند که مراکز تولید عظیم یا ترینال راه انتقال گفته می‌شوند، سیگنال‌های محلی برای استفاده در کنترل‌کننده نوسانات این تجهیزات به خوبی عمل می‌کنند. با این حال این فرض در مورد مزارع بادی که معمولاً دور از مناطق مرکز سیستم قدرت نصب شده‌اند درست نیست. در مرجع [۲۳]، یک کنترل‌کننده برای میرایی مدولاسیون هماهنگ دو کانال توان اکتیو-راکتیو برای DFIG ها ارائه شده است. نسبت بین کانال توان اکتیو و مدولاسیون کانال توان راکتیو از پارامترهای بهینه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بدست آمده است. تحقیقات منتشر شده نشان می‌دهند، در صورتی که سیگنال از راه دور برای کنترل‌کننده عناصر فعال سیستم، مانند ادوات FACTS و یا پیوند HVDC، تغذیه شوند، عملکرد دینامیکی سیستم به‌خصوص در مقایسه با سیگنال به‌طور محلی اندازه‌گیری شده افزایش خواهد یافت [۲۴]. سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده‌ی (WAMS)، فعال‌شده توسط استقرار پراکنده واحدهای اندازه‌گیری فازور

¹ Wide-area measurement system

² Phasor measurement units

³ Supplementary damping controller

⁴ Wide-area damping controller

⁵ Optimal oscillation damping controller

⁶ Wide-area power oscillation damper

⁷ Network control system

(PMUs)، قادر به گرفتن اطلاعات دینامیکی سیستم قدرت از جمله ولتاژ، جریان، زاویه، و فرکانس با وضوح بالا و زمان واقعی است. WAMS بر این اساس، فرصتی بی‌مانند در کنترل دینامیک و نوسانات سیستم قدرت ارائه می‌دهد. دستاوردها عمدتاً با توجه به اندازه‌گیری سنکرون زمان ثابت در نقاط مختلف یک شبکه برق به لحاظ جغرافیایی گسترده قابل اجرا است [۲۵]. در مرجع [۲۶]، با استفاده از سیگنالهای WAMS پایدارسازی مبتنی بر این اساس توسط الگوریتم گرگ خاکستری طراحی شده است. در مرجع [۲۷] از کنترل کننده فازی به عنوان PSS برای ژنراتور استفاده شده است. ولی سیگنال ورودی برای این میراساز به صورت محلی می‌باشد. در این مقاله برای هماهنگی بهینه بین میراساز ناحیه گسترده مبتنی بر DFIG و PSS نصب شده در ژنراتور و همچنین غلبه بر تأثیر تاخیر زمانی روش جدیدی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی قوی برای طراحی بهینه و هماهنگ استفاده شده است. در روش مذکور علاوه بر یافتن پارامترهای پایدارسازها، حداکثر حاشیه تاخیر زمانی که سیستم قدرت در آن پایدار می‌باشد نیز مشخص می‌گردد. همچنین تأثیر حضور منابع تجدیدپذیر مزارع بادی در میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای با وجود عدم قطعیت باد بررسی شده است. علاوه بر عدم قطعیت موجود در میزان سرعت باد، عدم قطعیت موجود در تاخیر زمانی و بار نیز در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی بر روی یک سیستم تست استاندارد شش ماشینه اعمال شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی غیر خطی به صورت بصری نشان داده شده است. خلاصه اهداف این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- طراحی کنترل کننده مقاوم در برابر تأخیر احتمالی موجود در انتقال داده‌ها در WAMS با استفاده از الگوریتم سالپ.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در سرعت باد، تاخیر زمانی و بار

سازماندهی مقاله به این صورت می‌باشد که در ادامه در بخش دوم مدل‌سازی سیستم قدرت به همراه بخشهای مختلف از جمله توربین بادی DFIG و تاخیر زمانی شرح داده شده است. در بخش سوم نحوه طراحی میراساز ناحیه گسترده به همراه الگوریتم اجتماع سالپ و تابع هدف ارائه شده است. در بخش چهارم نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه آورده شده است. در نهایت بخش آخر نتیجه گیری کلی مقاله توضیح داده شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم قدرت

در این بخش به مدل‌سازی سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک، پایدارساز سیستم قدرت PSS، مزرعه توربین بادی DFIG و همچنین سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده WAMS، پرداخته شده معادلات دینامیکی آن‌ها ارائه شده است.

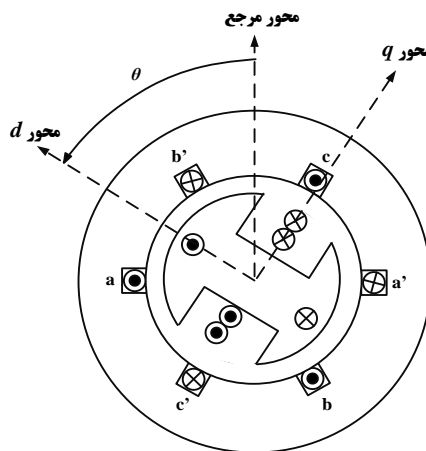
۲-۱- مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

در این پژوهش ژنراتورهایی که مجهز به سیستم تحریک در نظر گرفته شده، به صورت دو محوری مدل شده‌اند. برای این مدل روی هر کدام از محورهای طولی و عرضی ماشین‌ها یک سیم‌پیچ میراکننده در نظر گرفته می‌شود، اثرات گذرا لحاظ شده و فرضیات ذیل مدنظر قرار گرفته است:

(الف) در معادلات ولتاژ استاتور، تغییرات شار پیوستی محورهای طولی و عرضی در مقایسه با عبارتهای مربوط به ولتاژ چرخشی ناچیز فرض می‌شوند.

$$\omega \cong \omega_R = 1 p.u. \quad (\text{ب})$$

معادلات دینامیکی و جبری ژنراتور سنکرون مدل دو محوری که در شکل ۱ نشان داده شده است به صورت روابط (۱) - (۵) در نظر گرفته شده است [۲۸]:



شکل ۱. نمودار مدل ژنراتور سنکرون دو محوری [۲۸]

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \tag{1}$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\omega_s}{2H_i} (T_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_s)) \tag{2}$$

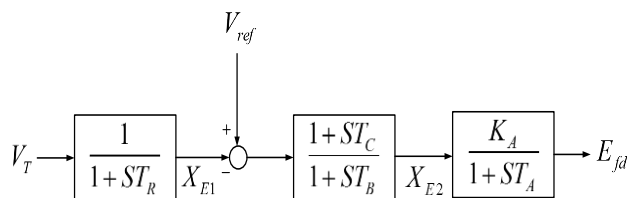
$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{\tau_{d0i}} (E_{fdi} - E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di})I_{di}) \tag{3}$$

$$\dot{E}'_{di} = \frac{1}{\tau_{q0i}} (-E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi})I_{qi}) \tag{4}$$

$$P_{ei} = (I_{di}E'_{di} + I_{qi}E'_{qi}) + (X'_{qi} - X'_{di})I_{di}I_{qi} \tag{5}$$

۲-۲ مدل‌سازی سیستم تحریک

مدل سیستم تحریک مورد استفاده در این مقاله مدل استاندارد IEEE AC4A می‌باشد، نمودار بلوکی سیستم تحریک در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۲. نمودار بلوکی سیستم تحریک [۲۹].

معادلات دینامیکی سیستم تحریک به صورت روابط (۶) - (۸) ارائه شده است.

$$\dot{E}_{fdi} = \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} X_{E2i} - \frac{1}{T_{Ai}} E_{fdi} \tag{6}$$

$$\dot{X}_{E1i} = \frac{1}{T_{Ri}} V_{Ti} - \frac{1}{T_{Ri}} X_{E1i} \quad (7)$$

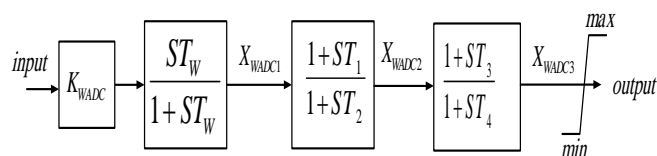
$$\dot{X}_{E2i} = \frac{1}{T_{Bi}} \left(\frac{T_{Ci}}{T_{Ri}} - 1 \right) X_{E1i} - \frac{1}{T_{Bi}} X_{E2i} + \frac{T_{Ci}}{T_{Bi} T_{Ri}} V_{Ti} + \frac{1}{T_{Bi}} V_{refi} \quad (8)$$

که V_{Ti} ولتاژ ترمینال نام ژنراتور سنکرون و V_{refi} ولتاژ مرجع و K_{Ai} دامنه و T_{Ai} ثابت زمانی سیستم تحریک می‌باشد. سیستم تحریک، یک منبع جریان مستقیم برای سیم‌پیچی میدان ماشین سنکرون است که جریان و ولتاژ میدان سیم‌پیچ تحریک را کنترل می‌کند.

۲-۳- مدل سازی پایدارساز سیستم قدرت

پایدارساز سیستم قدرت (PSS) و میراساز ناحیه گسترده (WADC) با اعمال سیگنال مکمل مناسب به ورودی سیستم تحریک و کنترل کمکی سیستم‌های مزارع بادی مجهز به DFIG قادر خواهند بود که پایداری دینامیکی سیستم را به نحو مطلوبی بهبود بخشند. در واقع پایدارساز با مدوله کردن تحریک ژنراتور، یک مؤلفه گشتاور الکتریکی میراکننده جهت میرایی نوسانات به وجود می‌آورد. این شیوه از آنجا اهمیت بالایی می‌یابد، که هزینه اجرایی آن نسبت به سایر روش‌های دیگر پایین است [۳۰].

نمودار بلوکی میراساز در نظر گرفته شده در این مقاله، در شکل (۳) نشان داده شده است [۳۱]. در این مدل، میراساز با صفرهای مختلط در مدل جبران ساز گنجانده شده است [۳۲]. اولین بلوک مربوط به جبران کننده پس فاز / پیش فاز می‌باشد، که صفرها و قطب‌های آن می‌تواند به صورت بهینه تنظیم شود. این بلوک مشخصه پیش فاز مناسب را برای جبران سازی پس فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور (فاصله هوایی) فراهم می‌کند. بلوک دوم مربوط به فیلتر بالاگذر یا فیلتر پاک‌سازی^۱، حذف کننده اثر حالت ماندگار با ثابت زمانی T_W می‌باشد، که در حالت ماندگار اجازه عبور سیگنال ورودی متناظر تغییرات سرعت را بدون تغییر می‌دهد [۷].



شکل ۳. نمودار بلوکی پایدارساز سیستم قدرت [۳۱]

معادلات دینامیکی پایدارساز با توجه به نمودار شکل ۳ به صورت (۹)–(۱۱) ارائه شده است.

$$\dot{X}_{WADC1} = -\frac{1}{T_W} X_{WADC1} + K_{WADC} \frac{1}{120\pi} \dot{\omega}_{ij} \quad (9)$$

$$\dot{X}_{WADC2} = -\frac{1}{T_2} X_{WADC2} + \frac{1}{T_2} X_{WADC1} + \frac{T_1}{T_2} \dot{X}_{WADC1} \quad (10)$$

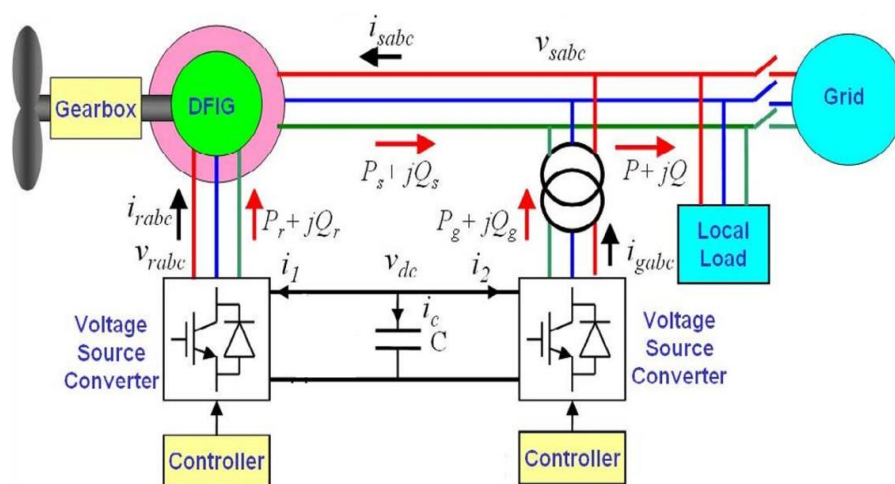
$$\dot{X}_{WADC3} = -\frac{1}{T_4} X_{WADC2} + \frac{1}{T_4} X_{WADC1} + \frac{T_3}{T_4} \dot{X}_{WADC2} \quad (11)$$

^۱ Washout filter

که $T_1 > 0, \dots, T_n$ پارامترهای پایدارساز می‌باشند که باید به صورت بهینه تنظیم شوند و K_{WADC} بهره WADC است، که می‌تواند مقدار ثابت و بهینه داشته باشد.

۲-۴- مدل سازی توربین بادی از دو سو تغذیه

توربین بادی توسط یک سیستم مکانیکی به DFIG وصل شده است. این سیستم مکانیکی شامل یک محور سرعت پایین و یک محور سرعت بالا است که توسط یک جعبه دنده از هم مجزا شده‌اند. ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده در این ساختار، از هر دو طرف رتور و استاتور شبکه الکتریکی را تغذیه می‌کند. در این ماشین استاتور مستقیماً به شبکه الکتریکی وصل شده است؛ در حالی که رتور توسط یک مبدل الکترونیک قدرت AC/DC/AC فرکانس متغیر به شبکه وصل شده است. به منظور تولید توان در فرکانس و ولتاژ ثابت برای یک شبکه الکتریکی در محدوده سرعت بین سرعت فوق‌سنکرون و سرعت زیرسنکرون، لازم است که توان انتقالی میان رتور و شبکه هم از لحاظ مقدار و هم از لحاظ جهت شمارش کنترل گردد.

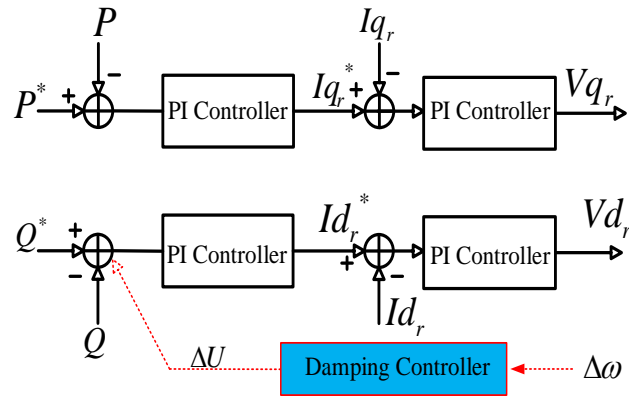


شکل ۴. ساختار ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)

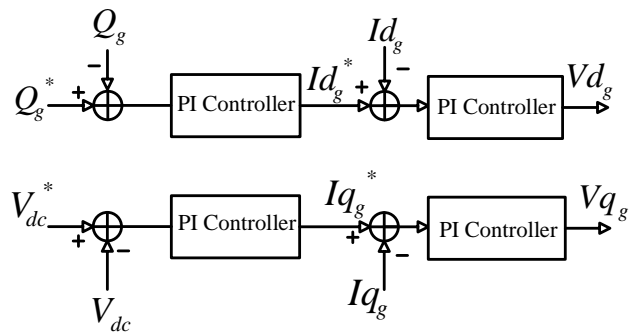
DFIGs، ژنراتورهای سنکرون رتور سیم‌پیچی با دو مبدل PWM منبع ولتاژ، یعنی یک مبدل سمت رتور (RSC) و دیگری مبدل طرف شبکه (GSC) هستند که به صورت (شکل ۴). این مبدل پشت-به-پشت^۱ همانند شکل ۴ در مدار رتور نصب شده‌اند و پایانه‌های حلقه لغزان به سیستم تغذیه AC متصل است. ژنراتور توربین بادی (WTG) شامل رتور ژنراتور، شفت توربین، گیربکس، و تیغه است. سیستم کنترل WTGs مبتنی بر DFIG شامل دو بخش مجزا است: کنترل توربین بادی و کنترل DFIG. کنترل توربین بادی با هدف بهینه سازی توان خروجی توربین بادی با کنترل زاویه پره و همچنین اجتناب از توان بیش از حد حاصل از باد شدید است. کنترل DFIG شامل کنترل کننده RSC و GSC برای کنترل توان اکتیو و راکتیو آن است. شکل ۵ نمودار بلوکی کنترل کننده RSC را نشان می‌دهد. حلقه محور q برای تنظیم توان اکتیو DFIG (P) و حلقه محور d برای کنترل توان راکتیو استاتور DFIG (Q) استفاده شده است. تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو با کنترل کننده PI کلاسیک انجام می‌گیرد. حلقه کنترل GSC، نشان داده شده در شکل (۶) دو هدف را در نظر دارد: (۱) تنظیم ولتاژ باس DC برای DFIG با عبور توان اکتیو از

^۱ Back-to-back

طریق GSC و RSC، ۲) تنظیم توان راکتیو DFIG GSC (Q_g). مشابه RSC، کنترل کننده PI کلاسیک در هر دو حلقه کنترل ولتاژ DC و کنترل Q_g استفاده می‌شود. به دلیل وجود دو کنترل کننده جداگانه در RSC، توابع اضافی می‌تواند توسط کنترل کمکی مکمل اجرا شود. در صورتی که کنترل کمکی برای توان اکتیو یا حلقه کنترل توان راکتیو اضافه شود، مدولاسیون توان اکتیو یا راکتیو حاصل خواهد شد [۳۳].



شکل ۵. ساختار کنترل میدل سمت روتور DFIG [۳۳]



شکل ۶. ساختار کنترل میدل سمت شبکه DFIG [۳۳]

معادلات دینامیکی یک ژنراتور القایی از دو سو تغذیه سه فاز در قاب مرجع چرخشی سنکرون $d-q$ به صورت روابط (۱۲)–(۱۴) نوشته می‌شود [۳۳]:

$$V_{ds} = V_s I_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (12)$$

$$V_{qs} = V_s I_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (13)$$

$$V_{dr} = V_s I_{dr} - s\omega \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (14)$$

بطوری که ω_s سرعت چرخشی سنکرون قاب مرجع و $s\omega_s = \omega_s - \omega_r$ فرکانس لغزش را نشان می‌دهد و شار پیوندی DFIG با روابط (۱۵)–(۱۸) مشخص می‌شود:

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} - i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (15)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (16)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (17)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (18)$$

بطوری که $L_r = L_m + L_{lr}$ ، $L_s = L_m + L_{ls}$ ، L_{lr} و L_m به ترتیب اندوکنانس‌های پیوندی استاتور و رتور و متقابل را نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۱۹) نیز گشتاور الکترو مغناطیسی DFIG را نشان می‌دهد

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (19)$$

P معرف تعداد قطب‌های ماشین القایی است. با چشم‌پوشی از تلفات توان مربوط به مقاومت استاتور، توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به صورت معادلات (۲۰) و (۲۱) بدست می‌آید:

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (20)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \quad (21)$$

و توان اکتیو و راکتیو رتور با معادلات (۲۲) و (۲۳) مشخص می‌شود:

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \quad (22)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}) \quad (23)$$

در قاب مرجع d - q میان مؤلفه‌های محور d و q روابط ریاضی (۲۲)–(۲۳) حاکم است.

$$i_{qs} = \frac{-L_m i_{qr}}{L_s} \quad (24)$$

$$i_{ds} = \frac{L_m (i_{ms} - i_{dr})}{L_s} \quad (25)$$

$$T_e = \frac{-\frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m^2 i_{ms} i_{qr}}{L_s} \quad (26)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \omega_s L_m^2 i_{ms} (i_{ms} - i_{dr}) L_s \quad (27)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \omega_s L_m^2 i_{ms} (i_{ms} - i_{dr}) L_s$$

بطوری که:

$$V_{dr} = r_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s \sigma L_r i_{qr} \quad (28)$$

$$V_{qr} = r_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - s \omega_s (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m^2 i_{ms}}{L_s}) \quad (29)$$

$$i_{ms} = \frac{V_{qs} - r_s i_{qs}}{\omega_s L_m} \quad (30)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (31)$$

معادلات فوق نشان می‌دهد که سرعت رتور DFIG (ω_r) و در نتیجه توان اکتیو استاتور به وسیله تنظیم مؤلفه جریان محور q (I_{qr})، و توان راکتیو استاتور Q_s به وسیله تنظیم مؤلفه محور d جریان رتور I_{dr} کنترل می‌شود. در نتیجه مقادیر مرجع I_{dr} و I_{qr} مستقیماً از تنظیم توان راکتیو استاتور و سرعت رتور یا توان استاتور DFIG بدست می‌آیند.

۲-۵ مدل‌سازی سیستم WAMS و تاخیر زمانی

با پیشرفت تکنولوژی اندازه‌گیری فازور سنکرون شده و تکنولوژی مخابراتی مدرن، سامانه‌های سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده WAMS نسبتاً به تکامل رسیده و کاربردهای بیشتری در سیستم قدرت یافته است. در حقیقت، WAMS بخش مهمی از شبکه هوشمند است زیرا کاربرد اصلی WAMS اندازه‌گیری و ثبت داده‌های مربوط به عملکرد سیستم قدرت می‌باشد و می‌تواند مقادیر زیادی اطلاعات از عملکرد مربوط به ژنراتورها، خطوط انتقال و مصرف‌کننده‌های توان را از نقاط دور فراهم کند. این اطلاعات غنی می‌توانند به وسیله اپراتور سیستم انتقال^۱ (TSO) مورد استفاده قرار گیرند و با مشخصه عملکرد شبکه هوشمند با سنسورهای بیشتر، اندازه‌گیری بیشتر و ارتباط بیشتر سازگار می‌باشند. به‌طور کلی، WAMS از سه قسمت اساسی تشکیل شده است [۳۴]:

۱- PMU های توزیع شده در اجزای اصلی سیستم قدرت

^۱ Transmission system operator

۲- ایستگاه مرکزی ثبت کننده داده‌ها کننده و مرکز کنترل

۳- شبکه ارتباط دیجیتال که دو قسمت ۱ و ۲ را به هم وصل می‌کند

بخش اول به‌طور کلی شامل نمونه‌برداری اطلاعات سنکرون شده می‌باشد که بایستی توانایی تطبیقی خاص جهت اطمینان از دقت نمونه‌برداری در زمان تغییر و شرایط عملکرد را نشان دهد (به‌عنوان مثال تغییرات فرکانس سیستم). بخش سوم مسئول انتقال داده‌های اندازه‌گیری شده نواحی مختلف می‌باشد. تجهیزات و تکنولوژی‌های کلیدی مربوط به این بخش شامل بار فیزیکی شبکه مخابراتی دیجیتال، پروتکل ارتباطی، سیستم مکان‌یابی جهانی^۱ (GPS) و غیره می‌باشند. برای قسمت دوم کار اصلی تجزیه سیگنال‌های اندازه‌گیری این ناحیه گسترده، مانیتور کردن مشخصه عملکردی سیستم، و فراهم کردن پشتیبان تصمیم‌گیری برای TSO می‌باشد. به‌طور هم‌زمان، این بخش همچنین می‌تواند سیگنال‌های کنترل برای تجهیزات کنترلی اصلی (همچون PSS، کنترلر HVDC، کنترلر FACTS و...) توزیع شده در سیستم قدرت را فراهم کند [۳۴].

لینک‌های مخابراتی به‌کاررفته در WAMS شامل حالت، انتقال با سیم (خطوط تلفن و فیبرهای نوری) و بدون سیم (ماهواره‌ها و لینک‌های مایکروویو) می‌باشد [۳۵]. موارد زیر ویژگی‌های لینک‌های مخابراتی برای WAMS می‌باشد:

- **خطوط تلفن:** مزیت اصلی خطوط تلفن قابلیت نصب آسان و استفاده ارزان می‌باشد.
- **کابل‌های فیبر نوری:** مزایای استفاده از فیبر نوری شامل مصونیت آن در مقابل اعوجاج RF و اتمسفری و همچنین پهنای باند قابل توجه که می‌تواند به‌وسیله شرکت‌های برقی برای نیازهای دیگر ارتباط راه دور استفاده گردد. برخلاف هزینه سرمایه‌گذاری بالا، کابل‌های فیبر نوری امروزه کاملاً استاندارد بوده و به‌طور وسیعی توسط شرکت‌های برقی نصب می‌شود.
- **ماهواره‌ها:** معایب استفاده از یک ماهواره هزینه بالای آن، پهنای باند کم و تاخیر مربوط به آن می‌باشد.
- **لینک‌های مایکروویو:** لینک‌های مایکروویو به‌وسیله شرکت‌های برق در حجم وسیعی استفاده می‌شوند. این لینک‌ها به‌عنوان یک گزینه بهتر در مقایسه با لینک‌های موقت در نظر گرفته می‌شود زیرا به‌آسانی قابل نصب بوده و دارای قابلیت بالا می‌باشد. تغذیه سیگنال و توزیع چندمسیره، اصلی‌ترین معایب لینک‌های مایکروویو می‌باشد. توانایی نرخ تبادل اطلاعات با سرعت بالا و مصونیت در مقابل اغتشاش لینک‌های مایکروویو دیجیتال آن‌ها را مبدل به انتخابی مناسب‌تر نسبت به لینک‌های مایکروویو آنالوگ جهت برآورده کردن نیازهای شبکه‌ها کرده است [۳۶].

جدول ۱. لینک‌های مخابراتی و تأخیرهای زمانی [۳۶]

تأخیر زمانی (میلی ثانیه)	لینک‌های مخابراتی
۱۰۰-۱۵۰	کابل فیبر نوری
۱۰۰-۱۵۰	لینک مایکروویو دیجیتال
۱۰۰-۳۵۰	سیستم (PLC) ^۲
۲۰۰-۳۵۰	خطوط تلفن
۵۰۰-۷۰۰	لینک ماهواره‌های

^۱ Global positioning system

^۲ Power line carrier

تاخیر در دریافت و ارسال سیگنال‌ها، می‌تواند سبب افزایش احتمال ناپایداری سیستم قدرت شود [۳۶]. جدول (۱) مقادیر معمول زمان‌های تأخیر در لینک‌های مخابراتی مختلف را نشان می‌دهد. با استفاده از سیگنال‌های WAMS مشاهده‌پذیری حالت سیستم جهت کنترل و بهبود پایداری، افزایش می‌یابد [۲۶] ولی عیب تأخیر زمانی در این سیگنال‌ها باعث کاهش پایداری و حتی ناپایداری سیستم می‌شود، لذا در طراحی‌های میراسازها اثر تأخیر زمانی باید در نظر گرفته شود.

برای مدل‌سازی اثر تأخیر زمانی در مطالعات دینامیکی از روش تقریب Padé استفاده شده است. دلیل این امر آن است که در مرحله خطی‌سازی امکان اعمال تاثیر تأخیر زمانی بر معادلات حالت و پاسخ سیستم فراهم گردد. نحوه اعمال این تقریب هم به صورت یک تابع تبدیل تقریب شده مرتبه ۲ الی ۵ می‌باشد که سیگنال‌های گرفته شده از نقاط مختلف سیستم به عنوان ورودی به تأخیر زمانی اعمال می‌گردد و خروجی این تقریب (بلوک) همان سیگنال ولی با تأخیر زمانی مشخص شده می‌باشد. در تقریب Padé برای مدل کردن تأخیر زمانی از بسط تیلور استفاده می‌شود. تابع تبدیل تقریب به صورت n جمله بسط داده توسط تقریب Padé در رابطه زیر نشان داده شده است [۳۷].

$$H(s) = e^{-sTd} \approx \frac{1 - K_1s + K_2s^2 + \dots \pm K_n s^n}{1 + K_1s + K_2s^2 + \dots \pm K_n s^n} \quad (32)$$

که n مرتبه تقریب و K ضرایب چند جمله‌ای تقریب Padé^۱ می‌باشد. در این مقاله از مرتبه پنجم تقریب Padé برای مدل‌سازی تأخیر زمانی سیگنال WAMS استفاده شده است.

۲-۶- مدل سازی عدم قطعیت

با توجه به ماهیت تصادفی باد با اندازه گیری‌های طولانی مدت در بازه‌های زمانی مختلف، از تابع چگالی احتمال سرعت باد برای محاسبه انرژی استفاده می‌شود [۳۸]. تابع توزیع ویبول یکی از توزیع‌های احتمالاتی پیوسته است. اگر چه این توزیع اولین بار توسط دانشمند فرانسوی فرچه^۱ در سال ۱۹۲۷ شناخته شد و سپس رزین^۲ و راملر^۳ در سال ۱۹۳۳ از آن برای توصیف توزیع اندازه ذرات بهره بردند، اما نام آن برگرفته از نام والدی وایبول^۴ است که آن را با جزئیات در سال ۱۹۵۱ توصیف کرد. برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک محل مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از آن از روش‌های آماری مختلفی استفاده می‌شود. در اکثر مواقع مدل آماری ویبول مطابقت بسیار خوبی با توزیع سرعت باد دارد. توان تولیدی توسط توربین‌های بادی در بازه زمانی با توجه به سرعت باد تغییر می‌کند. رابطه تقریبی توان خروجی توربین بادی طبق روابط (۳۳) می‌باشد: تولید برق بادی به سرعت باد و درگیری پره توربین با باد بستگی دارد. قدرت خروجی توربین بادی می‌تواند یکی از این سه مقدار باشد [۳۹].

¹ Ferche

² Resin

³ Ramler

⁴ Waloddi Weibull

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } V(t) < V_{cutin} \text{ or } V(t) > V_{cutout} \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{wt} V(t)^3 & \text{if } V_{cutin} < V(t) < V_{rated} \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{wt} V_{rated}^3 & \text{if } V_{rated} < V(t) < V_{cutout} \end{cases} \quad (33)$$

که P_{wt} قدرت خروجی مکانیکی توربین است (W)، ρ چگالی هوا (kg / m^3)، A_{wt} محدوده جابجایی توربین (m^2)، V سرعت باد (m / s)، C_p ضریب عملکرد (یا ضریب توان) توربین و V_{cutin} ، V_{rated} و V_{cutout} ، سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالای باد (m/s) توربین است. برای توصیف رفتار تصادفی سرعت باد از توابع چگالی احتمال^۱ (PDF) استفاده شده است. سرعت باد بیش از یک دوره زمانی از پیش تعیین شده با استفاده از PDF ویبول^۲ برآورد شده است.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (34)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (35)$$

$$c = \frac{\mu}{\Gamma(1+k^{-1})} \quad (36)$$

۳- طراحی میراساز نوسانات بین ناحیه‌ای

برای طراحی پایدارساز در این مطالعه از روش حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی توابع هدفی در نظر گرفته می‌شود، که این توابع هدف با قیود محدود می‌شوند. در ادامه به معرفی توابع هدف و قیود و خواص آن‌ها در طراحی پایدارساز اشاره خواهد شد. همچنین نحوه پیاده‌سازی الگوریتم اجتماع سالپ (SSA) برای طراحی پایدارساز توضیح داده می‌شود.

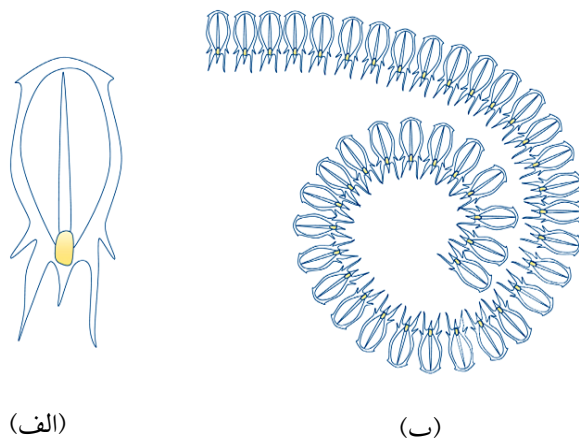
۳-۱- الگوریتم اجتماع سالپ

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع سالپ (SSA^۳) توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با توجه به رفتار اجتماعی سالپ‌ها ارائه شده است [۴۰]. سالپ‌ها متعلق به خانواده‌ای از Salpidae هستند که بدن شفاف و لوله‌ای شکل دارند. بافت بدن آن‌ها بسیار مشابه ژله ماهی است و بسیار شبیه ژله ماهی حرکت می‌کنند، به این صورت که آب از طریق بدن آن پمپ می‌شود تا نیروی رانش به سمت جلو فراهم شود. شکل سالپ به صورت تکی و به صورت گروهی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود.

¹ Probability density functions

² Weibull

³ Salp swarm algorithm



شکل ۷. (الف) سالپ تکی، (ب) گروهی از سالپ‌ها (زنجیره سالپ).

در مدل‌سازی الگوریتم اجتماع سالپ از رفتار اجتماعی و زنجیروار آنها برای جنبش و حرکت بهتر با استفاده از تغییرات سریع هماهنگ در جهت تعقیب غذا بهره گرفته شده است. برای مدل‌سازی ریاضی زنجیره‌های سالپ، ابتدا جمعیت به دو گروه تقسیم می‌شود: رهبر^۱ و پیروان^۲. رهبر گروه همان سالپ جلوی زنجیره است، و سایر سالپ‌ها به عنوان پیرو در نظر گرفته می‌شوند. همانطور که از نام این سالپ‌ها هم مشخص است، رهبر در واقع گروه را هدایت و رهبری می‌کند و پیروان از همدیگر (و به طور مستقیم یا غیرمستقیم از رهبر) پیروی می‌کنند. مشابه سایر روش‌های جمعی، موقعیت سالپ‌ها در یک فضای جستجوی Π بعدی تعریف می‌شود که در آن Π تعداد متغیرهای یک مسأله مشخص است. بنابراین، موقعیت همه سالپ‌ها در یک ماتریس دو بعدی موسوم به X ذخیره می‌شود. همچنین فرض می‌شود که یک منبع غذایی موسوم به F در فضای جستجو به عنوان هدف جمع وجود دارد. برای بروزرسانی موقعیت رهبر، معادله (۳۷) به کار می‌رود:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 \times ((ub_j - lb_j) \times c_2 + lb_j) & c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1 \times ((ub_j - lb_j) \times c_2 + lb_j) & c_3 < 0 \end{cases} \quad (37)$$

که x_j^1 نشان دهنده موقعیت اولین سالپ (رهبر) در بعد j ام، F_j موقعیت منبع غذایی در بعد j ام بوده، ub_j نشان دهنده کران بالای بعد j ام است، lb_j نشان دهنده کران پایین بعد j ام می‌باشند، c_1 ، c_2 و c_3 نیز اعداد تصادفی هستند. معادله (۳۷) نشان می‌دهد که رهبر فقط موقعیت خود را نسبت به منبع غذایی به‌روزرسانی می‌کند. ضریب c_1 مهم‌ترین پارامتر در الگوریتم SSA است چون کشف و بکارگیری تعریف شده به صورت ذیل را متعادل می‌کند:

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2} \quad (38)$$

l معرف تکرار کنونی بوده و L نشانگر حداکثر تعداد تکرارها است. پارامترهای c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در فاصله $[0, 1]$ تولید می‌شوند. در واقع، آنها نشان می‌دهند که آیا موقعیت بعدی در بعد j ام باید به سمت بی‌نهایت مثبت یا بی‌نهایت منفی باشد و نیز اندازه گام را نیز مشخص می‌کنند. برای بروزرسانی موقعیت پیروان، معادلات ذیل به کار گرفته می‌شوند (قانون

¹ Leader

² Followers

حرکت نیوتن) [۴۰]:

$$x_j^i = \frac{1}{2} a \times t + v_0 \times t \quad (39)$$

که x_j^i نشان دهنده موقعیت سالپ پیرو i ام در بعد j ام، t زمان، v_0 سرعت اولیه، و $\alpha = \frac{v_{final}}{v_0}$ است.

که در آن $v = \frac{x - x_0}{t}$ می باشد. چون زمان در بهینه‌سازی همان تکرار است، اختلاف میان تکرارها برابر ۱ است، و با در نظر گرفتن $v_0 = 0$ این معادله را می توان به صورت ذیل نوشت:

$$x_j^i = \frac{1}{2} (x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (40)$$

که x_j^i نشان دهنده موقعیت سالپ پیرو i ام در بعد j ام است. با معادلات (۳۷) و (۴۰)، زنجیره‌های سالپ را می توان شبیه‌سازی کرد. شبه کد الگوریتم SSA در شکل (۸) نشان داده شده است [۴۱].

مقدار دهی اولیه و ایجاد جمعیت اولیه سالپ ها با توجه به کران بالا و پایین lb, ub
حلقه while (تا برآورده شدن شرط توقف)
محاسبه تابع هدف برای هر عامل
انتخاب بهترین عامل جستجو
به روز رسانی C_1 با استفاده از معالعه (۳۸)
حلقه for برای هر سالپ
اگر $(i=1)$
بروزرسانی موقعیت سالپ رهبر با توجه به معادله (۳۹)
در غیر این صورت
بروزرسانی موقعیت پیروان با استفاده از معادله (۴۰)
پایان
پایان
چک کردن محدوده سالپ ها در محدوده lb, ub
پایان

شکل ۸. شبه کد الگوریتم SSA

۳-۲- توابع هدف و قیود

با توجه به این که نوسانات بین ناحیه به تغییرات سرعت و اختلاف سرعت بین ژنراتورهای نواحی مختلف بستگی دارد، از اینرو زمانی نوسانات فرکانس پایین دارای میرایی زیادی هستند که دامنه این نوسانات ناشی از اختلاف سرعت بین ژنراتورهای نواحی مختلف کم باشد. به همین منظور با محاسبه انتگرال زیر سطح این سیگنال‌ها به‌عنوان یک تابع هدف می‌توان با کمینه کردن آن پایداری سیستم را بهبود بخشید. تابع هدف مورد استفاده در این مطالعه طبق رابطه (۴۱) می‌باشد [۲۷].

$$J = \int_0^{t_{sim}} t \cdot \Delta \omega_{ij}^2 dt \quad (41)$$

که در آن $\Delta\omega_{i,j}$ اختلاف سرعت بین ژنراتورهای i و j در نواحی مختلف می‌باشد. برای بهینه کردن و تنظیم بهینه پارامترهای WADC با در نظر گرفتن تأخیر زمانی از قیود محدوده پارامترها استفاده شده است. به همین منظور مسئله بهینه‌سازی همراه با قیود به صورت رابطه (۴۲) بیان می‌شود [۲۷].

Minimize J

Subject to :

$$\begin{aligned} T_1^{\min} &\leq T_1 \leq T_1^{\max} \\ T_2^{\min} &\leq T_2 \leq T_2^{\max} \\ T_3^{\min} &\leq T_3 \leq T_3^{\max} \\ T_4^{\min} &\leq T_4 \leq T_4^{\max} \\ K_{WADC}^{\min} &\leq K_{WADC} \leq K_{WADC}^{\max} \\ K_1^{\min} &\leq K_1 \leq K_1^{\max} \\ K_2^{\min} &\leq K_2 \leq K_2^{\max} \end{aligned} \quad (42)$$

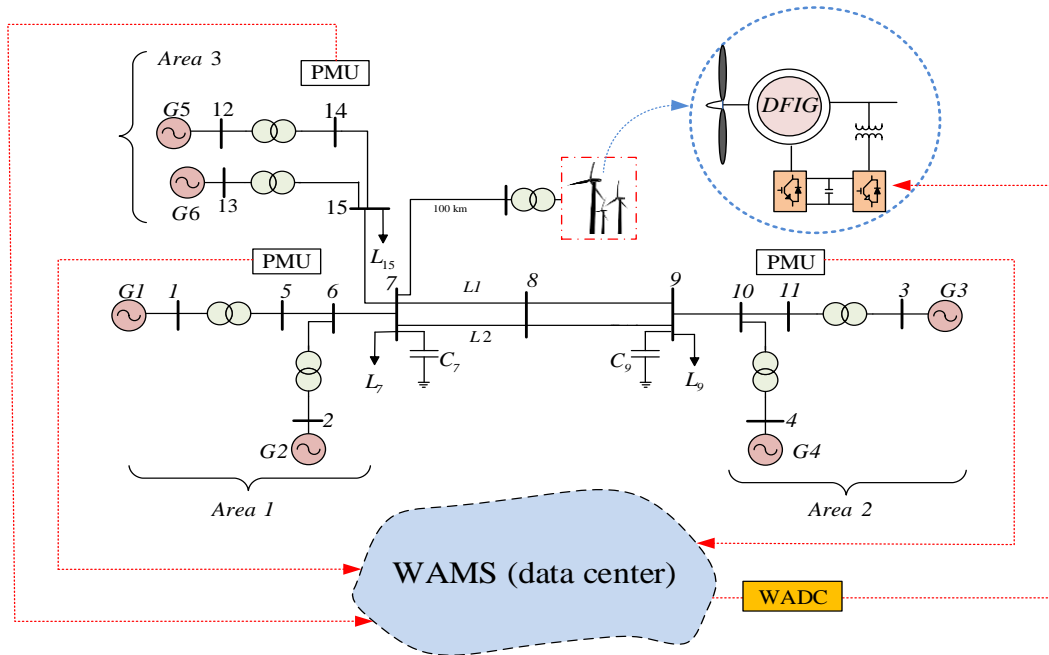
۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش به شبیه‌سازی و ارائه نتایج عددی حاصل از اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم مورد مطالعه در نرم افزار

MATLAB می‌پردازیم.

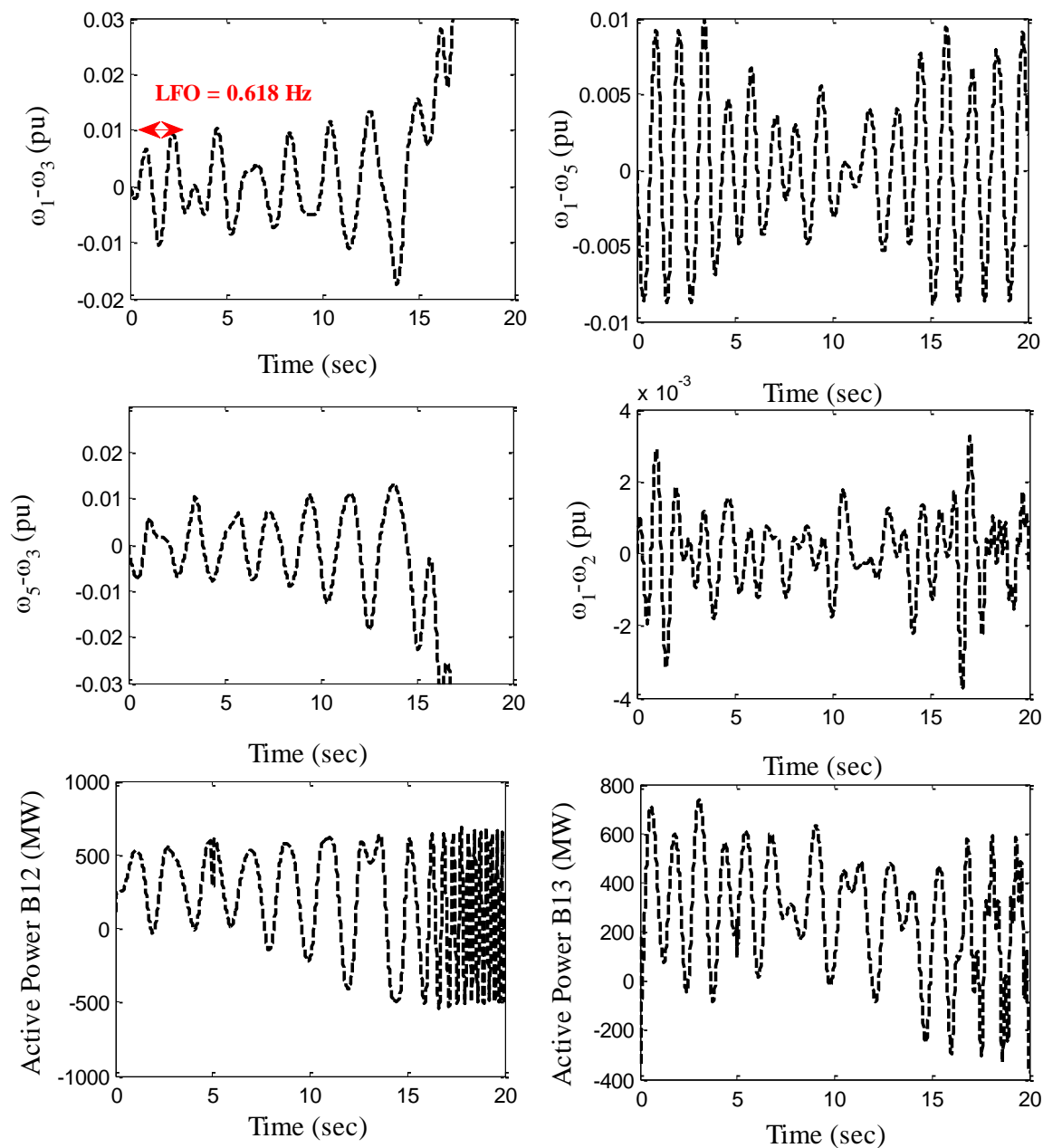
۴-۱- سیستم مورد مطالعه

از آنجا که هدف این پژوهش میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای و استفاده از تکنولوژی جدید PMUها در سیستم‌های قدرت و تأثیر میراساز مبتنی بر DFIG می‌باشد، لذا در این مطالعه از سیستم قدرت چندماشینه IEEE برای بررسی روش پیشنهادی استفاده شده است. سیستم‌های مورد مطالعه یک سیستم شش ماشینه سه ناحیه‌ای می‌باشد [۳۳]. در این مطالعه برای فائق آمدن بر مشکلات ناشی از سیگنال‌های محلی و برای افزایش کنترل پذیری و مشاهده پذیری مودهای بین ناحیه‌ای از سیگنال‌های راه دور که با استفاده از PMUها در اختیار مرکز کنترل قرار می‌گیرد استفاده شده است. ولی با توجه به مزیت‌های استفاده از PMUها با چالش تأخیر زمانی در سیگنال‌های ارسالی راه دور مواجه می‌شود که علاوه بر این که باعث بهبود پایداری سیستم قدرت نمی‌شوند بلکه می‌تواند باعث ناپایداری سیستم قدرت نیز بشوند. به همین منظور طراحی پایدارسازهای ناحیه گسترده مقاوم در برابر تغییرات تأخیر زمانی اهمیت دارد. در این مطالعه از روش بهینه‌سازی الگوریتم SSA که در بخش‌های اشاره شد برای طراحی WADC مقاوم در برابر تأخیر زمانی و بهبود پایداری سیستم قدرت استفاده شده است. در شکل ۹ نمودار بلوکی سیستم مورد مطالعه به همراه توربین بادی مجهز به DFIG نشان داده شده است. در این شکل نحوه ارتباط سیستم WAMS و داده‌های PMU به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۹. سیستم مورد مطالعه شش ماشینه به همراه DFIG

Open loop



شکل ۱۰. شبیه سازی سیستم مورد مطالعه در حالت حلقه باز بدون میراساز

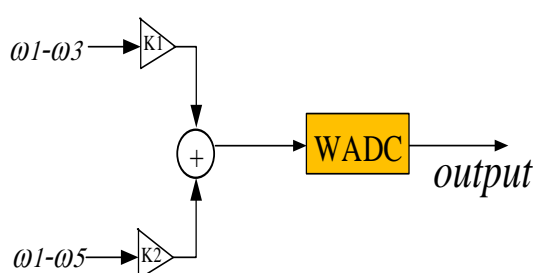
برای پایدارسازی سیستم قدرت از روش پیشنهادی در این مقاله استفاده شده است که در ادامه در دو سناریو بررسی شده است.

- طراحی بهینه میراساز بدون در نظر گرفتن تاخیر زمانی و عدم قطعیت
- طراحی بهینه میراساز با در نظر گرفتن تاخیر زمانی و عدم قطعیت

۴-۲- طراحی بهینه میراساز بدون در نظر گرفتن تاخیر زمانی و عدم قطعیت

در این بخش، کنترل کننده میراساز گسترده (WADC) برای میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای با استفاده از سیگنال‌های راه دور به بخش کنترلی ژنراتور القایی دو سو تغذیه DFIG اعمال شده است. همچنین PSS برای یک ژنراتور منتخب به صورت بهینه

به بخش AVR سیستم تحریک متصل شده است. سیگنال راه دور انتخاب شده به صورت شکل (۱۱) در این ساختار از دو سیگنال ورودی همراه با ضریب تاثیر وزنی استفاده شده است. دلیل استفاده از این ضرایب به خاطر آن است که برای میراسازی نوسانات فرکانس پایین، میزان مشارکت یا تاثیر هر یک از سیگنال‌های ورودی با تعیین مقدار این ضرایب توسط الگوریتم بهینه‌سازی هم‌زمان با پارامترهای WADC تعیین می‌شود. سیگنال‌های ورودی اختلاف سرعت ژنراتورهای یک و سه، و اختلاف سرعت بین ژنراتورهای یک و پنج از سه ناحیه می‌باشد. در این حالت کنترل پذیری و رویت‌پذیری مود بین ناحیه‌ای بیشتر می‌باشد. در ادامه نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای طراحی WADC با استفاده از الگوریتم SSA برای تاخیر زمانی صفر در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۳ مقادیر بهینه PSS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سالپ را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی غیر خطی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. ساختار میراساز ناحیه گسترده

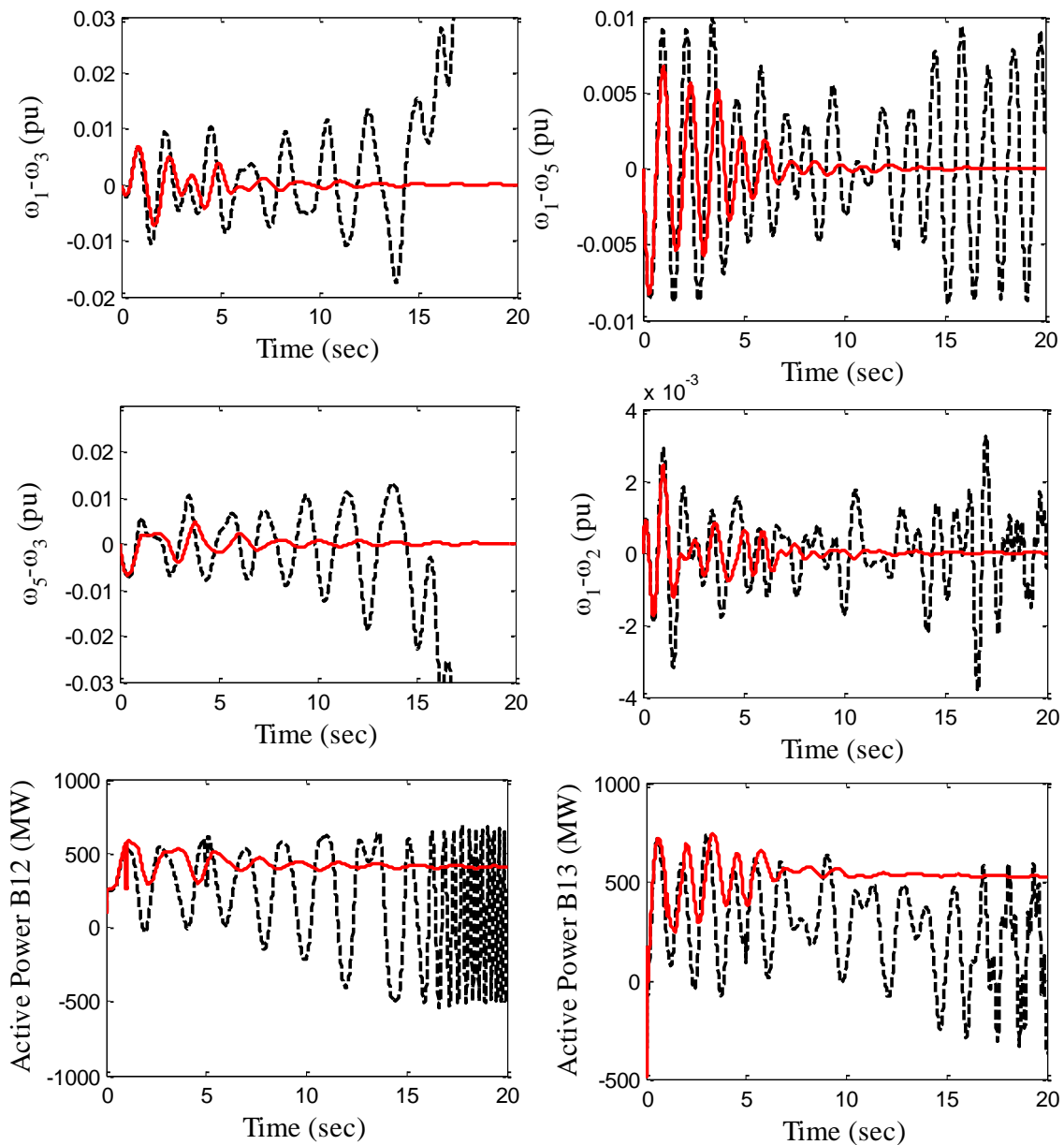
جدول ۲. مقادیر بهینه WADC با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی سالپ

$T_d = 0$ ms	K_{WADC}	T_1	T_2	T_3	T_4	K_1	K_2
SSA	۶۸/۳۵۶۴	۰/۳۶۴۲	۱/۱۰۷۴	۰/۰۳۴۶	۲/۳۴۳	۶/۰۱۷۲	۹/۳۶۱۵

جدول ۳. مقادیر بهینه PSS با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی سالپ

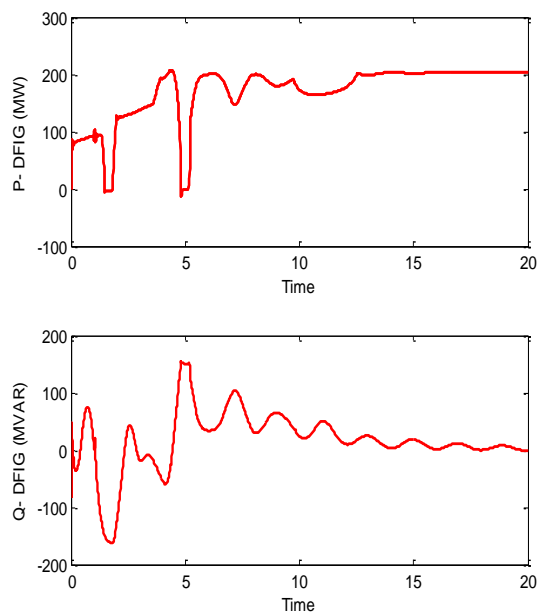
$T_d = 0$ ms	K_{PSS}	T_1	T_2	T_3	T_4
SSA	۴۵/۳۶	۰/۴۵۷۸	۰/۵۳۱۷	۰/۳۲۴۸	۰/۶۳۷۸

Close loop



شکل ۱۲. شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه در حالت حلقه بسته با حضور DFIG (--- حلقه باز، - حلقه بسته)

در ابتدا WADC اعمال شده به توربین بادی بدون در نظر گرفتن تاخیر زمانی می‌باشد. در این حالت نوسانات فرکانس پایین با استفاده از توربین بادی و PSS متصل به ژنراتور به خوبی میرا می‌شود. در شکل ۱۲ اختلاف سرعت ژنراتور مربوط به نواحی‌های مختلف سیستم قدرت و توان انتقالی بین نواحی مختلف نشان داده شده است. در شکل ۱۳ توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط توربین بادی نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان گفت که حضور توربین بادی شامل DFIG که مجهز به WADC می‌باشد باعث بهبود پایداری سیستم و افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای شده است.

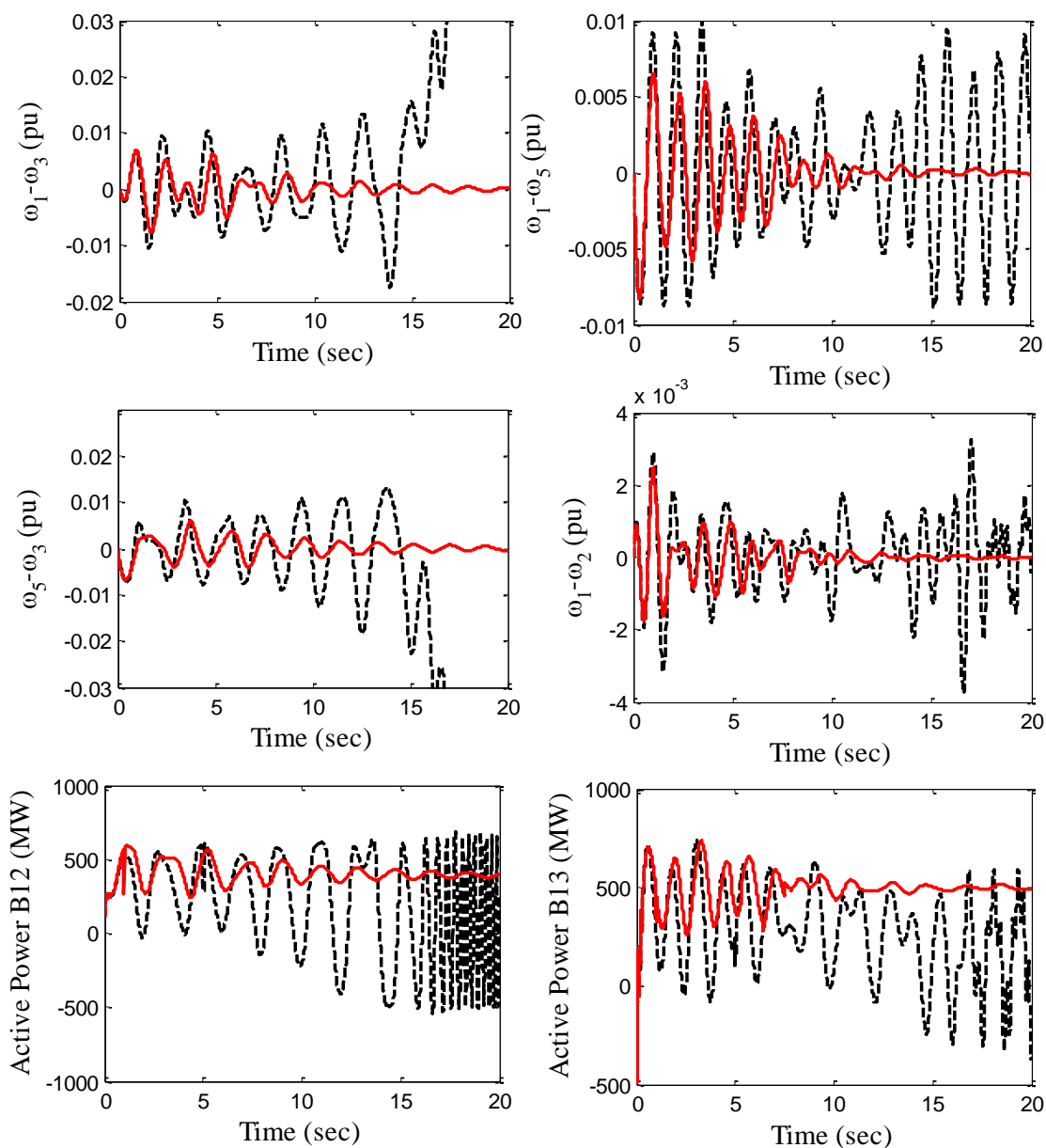


شکل ۱۳. توان اکتیو و راکتیو توربین بادی مجهز به DFIG

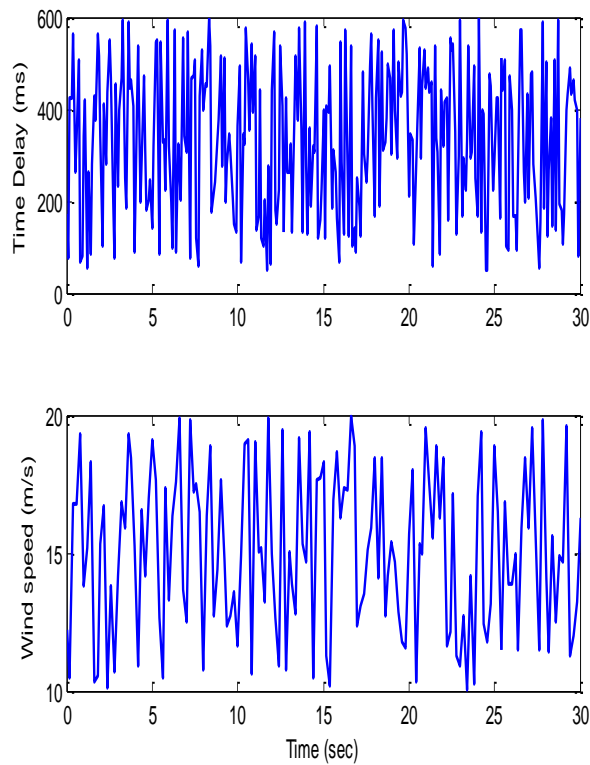
۴-۳- طراحی بهینه میراساز با در نظر گرفتن تاخیر زمانی و عدم قطعیت

در این بخش برای بررسی مقاوم بودن WADC طراحی شده با روش پیشنهادی که بر روی حلقه کنترلی DFIG نصب شده است، شبیه‌سازی‌ها را به ازای تاخیرهای زمانی مختلف انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی غیر خطی سیستم سه ناحیه‌ای به ازای تاخیرهای زمانی مختلف در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نشان داده شده است. همچنین میزان سرعت باد نیز به صورت تصادفی از طریق تابع توزیع ویبول تعیین شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی به ازای تاخیرهای زمانی مختلف اعمال شده به WADC پایداری سیستم با افزایش تاخیر زمانی کاهش نیافته و یا ناپایدار نمی‌شود و DFIG هم‌چنان به میراسازی نوسانات فرکانس پایین ادامه می‌دهد.

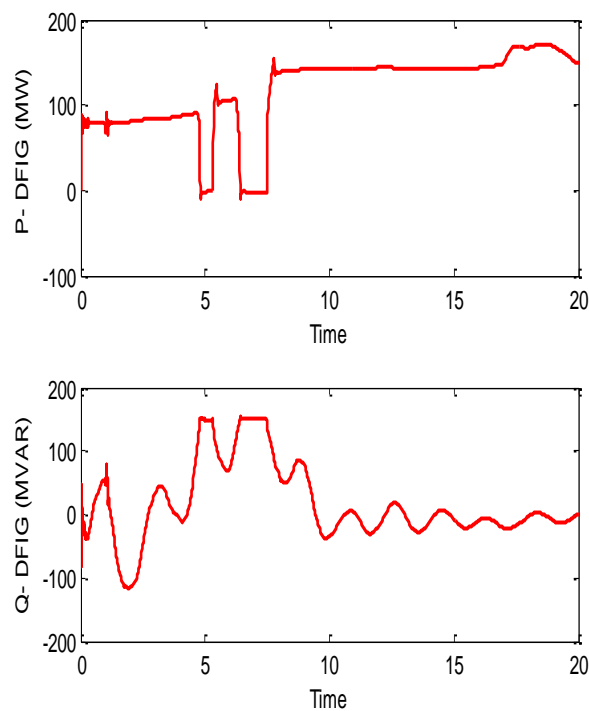
Close loop



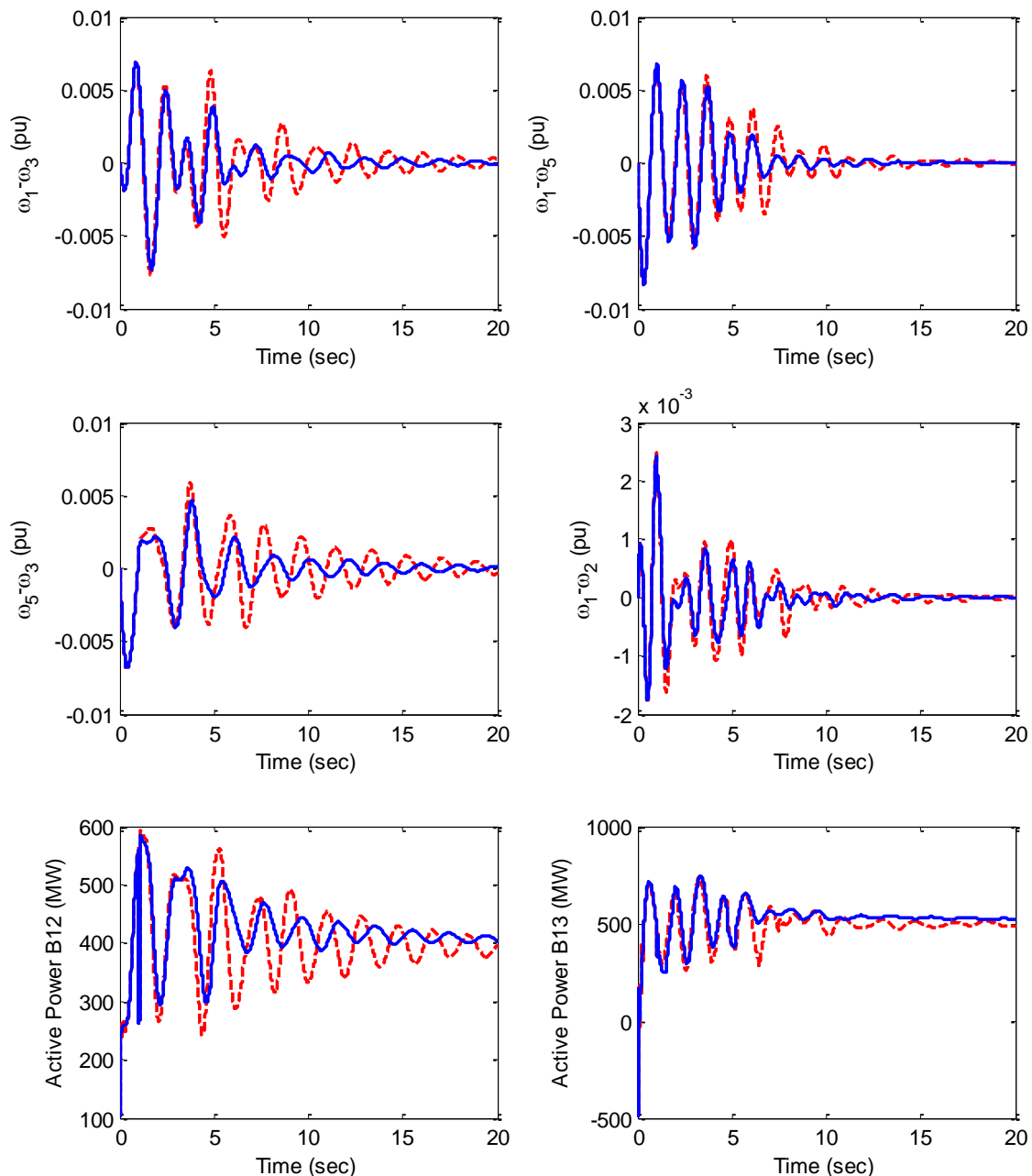
شکل ۱۴. شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه در حالت حلقه بسته با حضور DFIG یا در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد و تاخیر زمانی (--- حلقه باز، - حلقه بسته)



شکل ۱۵. تغییرات تاخیر زمانی و سرعت باد به صورت تصادفی



شکل ۱۶. توان اکتیو و راکتیو توربین بادی مجهز به DFIG



شکل ۱۷. شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه در حالت حلقه بسته با حضور DFIG با در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد و تاخیر زمانی (--- با تاخیر زمانی، - بدون تاخیر زمانی)

۴-۴- مقایسه عددی

در این بخش برای بررسی و مقایسه سناریوهای ارائه شده در بخش‌های پیشین از شاخص‌های ارزیابی نظیر JSE، ITEA، ITSE برای سیگنال‌های مختلف در حالت تأخیر زمانی صفر استفاده شده است. نحوه محاسبه روابط شاخص‌های ارزیابی مذکور در روابط (۴۳)–(۴۵) آورده شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر و بررسی کارایی روش پیشنهادی، مقادیر شاخص‌ها برای دو الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک نیز محاسبه شده است. در جدول ۴ شاخص ارزیابی سیستم قدرت سه ناحیه ای نمایش داده شده است.

$$ISE = \int_0^{t^{sim}} \Delta \omega_{ij}^2 dt \quad (43)$$

$$ITEA = \int_0^{t^{sim}} t \cdot |\Delta \omega_{ij}| dt \quad (44)$$

$$ITSE = \int_0^{t^{sim}} t \cdot \Delta \omega_{ij}^2 dt \quad (45)$$

جدول ۴. شاخص ارزیابی سیستم قدرت سه ناحیه‌ای

	سیگنال	ISE	ITEA	ITSE
No Device	$\Delta \omega_{13}$	14.8861	192.9564	262.5451
	$\Delta \omega_{15}$	0.044696	9.1549	0.18329
	$\Delta \omega_{35}$	14.9462	194.395	263.3984
الگوریتم سالپ	$\Delta \omega_{13}$	0.012098	3.1345	0.024709
	$\Delta \omega_{15}$	0.017186	3.7401	0.026675
	$\Delta \omega_{35}$	0.0093315	2.8851	0.016045
الگوریتم ازحام ذرات	$\Delta \omega_{13}$	0.018942	3.7641	0.027911
	$\Delta \omega_{15}$	0.018421	3.9289	0.028462
	$\Delta \omega_{35}$	0.010672	3.1373	0.019480
الگوریتم ژنتیک	$\Delta \omega_{13}$	0.023416	3.9854	0.029341
	$\Delta \omega_{15}$	0.019342	4.1374	0.031428
	$\Delta \omega_{35}$	0.011236	3.2464	0.021094

۵- نتیجه گیری

نوسانات در سیستم‌های قدرت به دلیل وجود اغتشاشاتی از قبیل خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین، نوسانات توان-زاویه رخ می‌دهند که میرا کردن این نوسانات برای بالا بردن قابلیت اعتماد سیستم امری مهم است. در این مطالعه برای طراحی پایدارساز ناحیه گسترده WADC در سایت مزارع بادی همراه با در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی موجود در سیگنال راه دور، و با در نظر گرفتن ورودی‌های سراسری از روش بهینه‌سازی مبتنی بر SSA استفاده شده است.

به منظور بررسی نوسانات فرکانس پایین شامل نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای، سیستمی انتخاب شد که دارای چندین ماشین و چندین ناحیه است. به همین دلیل سیستم سه ناحیه‌ای شش ماشینه و دو ناحیه‌ای چهار ماشینه به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شد. مزارع بادی به نحو مناسبی در ناحیه یک سیستم اثر داده شد. هر یک از نواحی این سیستم شامل دو ماشین بوده که از طریق دو خط انتقال ۲۲۰ کیلومتری به همدیگر متصل شده‌اند. توان تزریقی توسط سیستم‌های بادی به شبکه برابر ۲۰۰ مگاوات بوده

است. همان طوری که می‌دانیم با وقوع اغتشاشات مختلف در سیستم قدرت، نوسانات مختلفی با محدوده فرکانسی مختلف می‌تواند در سیستم رخ دهد. پژوهش حاضر، خطای بررسی شده خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین می‌باشد که در وسط خط از سیستم موردنظر رخ داده و به مدت زمان ۲۰۰ میلی ثانیه به طول انجامید. در پی این خطا نوسانات فرکانس پایین مختلفی همچون نوسانات بین ناحیه‌ای به وقوع پیوست. در این راستا هدف اصلی میراسازی این نوسانات و حفظ پایداری سیستم بوده است.

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SSA به ازای تأخیر زمانی صفر، پارامترهای WADC که به حلقه کنترلی توان راکتیو توربین بادی مجهز به DFIG اضافه شده است، به صورت بهینه تعیین گردید. نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که تأخیر در سیگنال ورودی کنترل کننده میراساز مبتنی بر WAMS اعمال شده بود نشان داد که با وجود تأخیر در سیگنال ورودی کنترل کننده میراساز، عملکرد این کنترل کننده کاملاً تخریب شده و کنترل کننده میراساز قادر به میراسازی نوسانات نمی‌باشد. لذا مهم ترین نتیجه‌ای که در این بخش گرفته شد این نکته می‌باشد که در طراحی کنترل کننده‌های میراساز کلاسیک مبتنی بر WAMS مهم ترین نکته‌ای که باید در نظر گرفته شود جبران اثر مخرب تأخیر موجود در این سیستم‌ها می‌باشد.

در نتیجه پارامترهایی که به دست آمد به گونه‌ای بود که کنترل کننده میراساز مبتنی بر WAMS هم‌زمان نوسانات بین ناحیه‌ای را میرا کرده و اثر تأخیر را جبران نمود. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای حالتی که WADC مقاوم در برابر تأخیر به سیستم کنترل مزرعه بادی اضافه شده نشان داد که این سیستم به راحتی می‌تواند با وجود تأخیر زیاد در سیگنال ارسالی، از ناپایداری سیستم جلوگیری کرده و نوسانات سیستم را میرا کند.

مراجع

- [1] Shi X, Cao Y, Li Y, Ma J, Shahidehpour M, Wu X, Li Z. Data-driven model-free adaptive damping control with unknown control direction for wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 Dec 1;123:106213.
- [2] Alinezhad MJ, Radmehr M, Ranjbar S. Adaptive wide area damping controller for damping inter-area oscillations considering high penetration of wind farms. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020 Jun;30(6):e12392.
- [3] Gurung N, Bhattarai R, Kamalasan S. Optimal Oscillation Damping Controller Design for Large-Scale Wind Integrated Power Grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020 Apr 20;56(4):4225-35.
- [4] Nan J, Yao W, Wen J, Peng Y, Fang J, Ai X, Wen J. Wide-area power oscillation damper for DFIG-based wind farm with communication delay and packet dropout compensation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021 Jan;124:106306.
- [5] Khan L, Lo KL. Hybrid micro-GA based FLCs for TCSC and UPFC in a multi-machine environment. *Electric Power Systems Research*. 2006 Jun 1;76(9-10):832-43.
- [6] Rogers G. *Power system oscillations*. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [7] Kundur P, Balu NJ, Lauby MG. Synchronous machine theory and modelling. *Power system stability and control*. 1994;7:93-105.
- [8] Yang X, Feliachi A. Stabilization of inter-area oscillation modes through excitation systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1994 Feb;9(1):494-502.
- [9] Larsen EV, Sanchez-Gasca JJ, Chow JH. Concepts for design of FACTS controllers to damp power swings. *IEEE Transactions on power systems*. 1995 May;10(2):948-56.
- [10] Yao W, Jiang L, Wu QH, Wen JY, Cheng SJ. Delay-dependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010 Dec 17;26(1):233-40.
- [11] Xie X, Xiao J, Lu C, Han Y. Wide-area stability control for damping interarea oscillations of interconnected power systems. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. 2006

- Sep 1;153(5):507-14.
- [12] Tomsovic K, Bakken DE, Venkatasubramanian V, Bose A. Designing the next generation of real-time control, communication, and computations for large power systems. *Proceedings of the IEEE*. 2005 May 9;93(5):965-79.
- [13] Jiang L, Yao W, Wu QH, Wen JY, Cheng SJ. Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays. *IEEE Transactions on Power systems*. 2011 Nov 14;27(2):932-41.
- [14] Stahlhut JW, Browne TJ, Heydt GT, Vittal V. Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008 Jan 21;23(1):84-91.
- [15] Kamel O.M, Abdelaziz A.Y, Zaki Diab A.A., Damping Oscillation Techniques for Wind Farm DFIG Integrated into Inter-Connected Power System. 2020. *Electric Power Components and Systems*, 48: 1551-1570.
- [16] Miao Z, Fan L, Osborn D, Yuvarajan S. Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009 May 19;24(2):415-22.
- [17] Gupta AK, Verma K, Niazi KR. Robust coordinated control for damping low frequency oscillations in high wind penetration power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2019 May;29(5):e12006.
- [18] Fan L, Yin H, Miao Z. On active/reactive power modulation of DFIG-based wind generation for interarea oscillation damping. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010 Dec 30;26(2):513-21.
- [19] Tsourakis G, Nomikos BM, Vournas CD. Contribution of doubly fed wind generators to oscillation damping. *IEEE Transactions on energy conversion*. 2009 Aug 7;24(3):783-91.
- [20] Mishra Y, Mishra S, Tripathy M, Senroy N, Dong ZY. Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009 Jun 16;24(3):650-60.
- [21] Kshatriya N, Annakkage UD, Hughes FM, Gole AM. Optimized partial eigenstructure assignment-based design of a combined PSS and active damping controller for a DFIG. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2009 Nov 3;25(2):866-76.
- [22] Mokhtari M, Khazaei J, Nazarpour D. Sub-synchronous resonance damping via doubly fed induction generator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013 Dec 1;53:876-83.
- [23] GCai G, Chen X, Sun Z, Yang D, Liu C, Li H. A Coordinated dual-channel wide area damping control strategy for a doubly-fed induction generator used for suppressing inter-area oscillation. *Applied Sciences*. 2019 Jan;9(11):2353.
- [24] Yazdani L., Aghamohammadi M R. Damping inter-area oscillation by generation rescheduling based on wide-area measurement information. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 67: 138-151.
- [25] "Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability | SmartGrid.gov," 2010. .
- [26] Shakarami MR, Davoudkhani IF. Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay. *Electric Power Systems Research*. 2016 Apr 1;133:149-59.
- [27] Rokni Nakhi P, Ahmadi Kamarposhti M. Multi objective design of type II fuzzy based power system stabilizer for power system with wind farm turbine considering uncertainty. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020 Apr;30(4):e12285.
- [28] Sauer PW, Pai MA. *Power System Dynamics and Stability*, 2006, Champaign, IL.
- [29] Anderson PM, Fouad AA. *Power system control and stability*. John Wiley & Sons; 2008 Sep 12.
- [30] Shayeghi H, Shayanfar HA, Safari A, Aghmasheh R. A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment. *Energy Conversion and Management*. 2010 Apr 1;51(4):696-702.
- [31] da Cruz J, Zanetta Jr LC. Stabilizer design for multimachine power systems using mathematical programming. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 1997 Nov 1;19(8):519-23.
- [32] Zanetta LC, Da Cruz JJ. An incremental approach to the coordinated tuning of power systems stabilizers using mathematical programming. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005 May

- 2;20(2):895-902.
- [33] Mokhtari M, Aminifar F. Toward wide-area oscillation control through doubly-fed induction generator wind farms. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014 Mar 18;29(6):2985-92.
- [34] Bose A. Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure. *IEEE transactions on Smart Grid*. 2010 Apr 26;1(1):11-9.
- [35] Mokhtari M, Aminifar F, Nazarpour D, Golshannavaz S. Wide-area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communication delays. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012 Oct 2;28(2):1997-2005.
- [36] Naduvathuparambil B, Valenti MC, Feliachi A. Communication delays in wide area measurement systems. In *Proceedings of the thirty-fourth southeastern symposium on system theory (Cat. No. 02EX540)* 2002 Mar 19 (pp. 118-122). IEEE.
- [37] Philipp LD, Mahmood A, Philipp BL. An improved refinable rational approximation to the ideal time delay. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1999 May;46(5):637-40.
- [38] Nowdeh SA, Davoudkhani IF, Moghaddam MH, Najmi ES, Abdelaziz AY, Ahmadi A, Razavi SE, Gandoman FH. Fuzzy multi-objective placement of renewable energy sources in distribution system with objective of loss reduction and reliability improvement using a novel hybrid method. *Applied Soft Computing*. 2019 Apr 1;77:761-79.
- [39] Jahannoosh M, Nowdeh SA, Naderipour A, Kamyab H, Davoudkhani IF, Klemeš JJ. New hybrid meta-heuristic algorithm for reliable and cost-effective designing of photovoltaic/wind/fuel cell energy system considering load interruption probability. *Journal of Cleaner Production*. 2021 Jan 1;278:123406.
- [40] Mirjalili S, Gandomi AH, Mirjalili SZ, Saremi S, Faris H, Mirjalili SM. Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems. *Advances in Engineering Software*. 2017 Dec 1;114:163-91.
- [41] Naderipour A, Abdul-Malek Z, Noorden ZA, Davoudkhani IF, Nowdeh SA, Kamyab H, Chelliapan S, Ghiasi SM. Carrier wave optimization for multi-level photovoltaic system to improvement of power quality in industrial environments based on Salp swarm algorithm. *Environmental Technology & Innovation*. 2021 Feb 1;21:101197.