



Original Research

E-ISSN: 2538-4430

ISSN: 2382-9796

Supplementary Damping Controllers Design in VSC HVDC Systems and Wind Farms to Improve Stability and Energy Conversion in Wind Turbine Using Proposed Genetic-Bat Algorithm

Naser Taheri^{1*}, Ehsan Akbari², Nematollah Askari³, Vazir Ahmad Tajik⁴, Hamed Orojlo⁵, Ali Mohammad Kazemi⁶, Ghorban Ghasemi⁷

¹ Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

² Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

^{3,5,6} Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

⁴ Department of Computer and Information Technology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

⁷ Assistant Professor, Department of Mathematics, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.12.2021

Revised: 01.04.2022

Accepted: 02.19.2022

Keyword:

Power system stability
VSC HVDC system
Fractional Order PID Damping Controller
Genetic-Bat algorithm
Wind turbine
Torsional modes

*Corresponding Author:

Naser Taheri

Email: ntaheri@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Connecting wind turbines to power networks without adversely affecting system stability is one of the most important future challenges to expand wind farms. In this paper, to improve the power network stability, damping the oscillations caused by torsional modes and increasing the energy conversion efficiency of wind turbines, a new control strategy was proposed for the active power control loop of wind turbines as well as HVDC transmission systems. First, the nonlinear speed-power curve of the wind turbine was shown to be effective in damping coefficients of torsional modes, energy conversion efficiency and the stability of the wind turbine. Accordingly, the use of wind turbine stabilizer in the wind turbine power control loop was proposed. Since the wind power plant is effective in the flow of the active-reactive power components, the use of supplementary damping controllers in the rectifier of VSC HVDC system was proposed to improve the voltage profile and the dynamic stability of the power network. The fractional order PID controllers were used in the proposed control strategy whose coefficients were adjusted using the proposed genetic-bat algorithm. In this algorithm, in order to avoid the rapid convergence of bats to local extremes and the optimal development of the search space, two operators of genetic algorithms, the dynamic mutation based on probabilities and the crossover were used. The simulation results showed that under the proposed control strategy, the stability of the system and the voltage profile in the network were significantly improved.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Connecting wind turbines to power networks without adversely affecting system stability is one of the greatest challenges of the future expanding wind farms. In the present research, to improve the power network stability, damping the oscillations caused by torsional modes and increasing the energy conversion efficiency of wind turbines, a new control strategy was proposed for the active power control loop of wind turbines as well as HVDC transmission systems. First, it was shown that the nonlinear speed-power curve of the wind turbine is effective on the damping coefficients of torsional modes, the energy conversion efficiency and the stability of the wind turbine. Accordingly, the use of wind turbine stabilizer in the wind turbine power control loop was proposed. Since the wind power plant was effective on the flow of the active-reactive power components, the use of supplementary damping controllers in the rectifier of VSC HVDC system was proposed to improve the voltage profile and the dynamic stability of the power network. The fractional order PID controllers were used in the proposed control strategy where its coefficients were adjusted using the proposed genetic-bat algorithm. In this algorithm, in order to avoid the rapid convergence of bats to local extremes and the optimal development of the search space, two operators of genetic algorithms, the dynamic mutation based on probabilities and the crossover were used. The simulation results showed that under the proposed control strategy, the stability of the system and the voltage profile in the network were significantly improved.

Methodology

In this research, first, dynamic modeling of a power system including classical power plants, wind power plants and VSC HVDC transmission systems was carried out. Then, a control strategy (including three individual control loops) was proposed ensuring the stable operation of the ac system and wind farm under different working conditions. The wind turbine stabilizer control loop was designed based on the turbine operating points and the speed-power characteristic curve in the wind turbine. It was shown that for different wind turbine operating points, the damping coefficient of torsional modes was variable and the use of wind turbine stabilizer controller was necessary to amplify the damping torque and damping the oscillations of the torsional modes. Then, two independent control loops were proposed to amplify the damping coefficient of the oscillation modes of the power system through the VSC HVDC rectifier converter. These controllers were responsible for enhancing the dynamic stability of the power system. Supplementary controllers in the present research were based on fractional order PID controllers whose coefficients were adjusted using the proposed genetic-bat evolutionary algorithm. The proposed algorithm corrects the limited oscillations of bats, which could result in convergence to local extremes. This modification was achieved through the use of dynamic mutation operators and crossover of genetic algorithms and the optimal development of the search space of bats.

Results and discussion

Wind turbine torsional modes are affected by the turbine speed-power curve and for different areas of this curve, the effect of torsional modes on the turbine performance is not

the same. Accordingly, the simulation of the power system under study was performed with the presence of designed controllers and in different areas of the wind turbine speed-power curve. When the proposed stabilizing controller was used in the wind turbine, the power system was stabilized in the whole set of operating points of the system and the oscillations of the components of rotor speed changes in power plants, load angle and displacement angle were significantly reduced. In addition, the voltage profile was improved and at the end of the simulation time, the voltage stabilization was observed to be at the nominal value. The use of VSC HVDC controllers together with the wind turbine stabilizer controller further improved the dynamic performance of the power system in such a way that the settling time of the studied signals reduced from 30 seconds to approximately 15 seconds and the signal overshoot at the beginning of the simulation was reduced by approximately 10%. In general, the use of controllers stabilized the power system and the terminal voltage of power plants. One of the most important results of the analysis of responses was depending on the operating conditions of the wind turbine, the degree of participation of the turbine in providing damping torque was variable. The oscillations of the torsional modes were well damped with the proposed controllers and an improvement of the voltage profile and the dynamic stability margin of the power system was observed.

Conclusion

In this paper, the use of supplementary stabilization controllers in the VSC HVDC system as well as the active power control loop in the wind turbine was recommended. It was shown that by using the wind turbine stabilizer controller in the active power control loop, the damping torque required for the wind turbine can be provided. Moreover, the addition of stabilizing control loops to the VSC HVDC system led to improvement of the stability margin of the power system and voltage stabilization in the over system. The simulation results of the system under study in addition to the proposed control strategy performed in MATLAB software show the effectiveness of the control method to improve the dynamic stability of the power system and also increase the energy conversion efficiency in the wind turbine.



دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۱، دوره ۱۹، شماره ۱، ۳۸۱-۳۵۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

DOI: [10.48301/KSSA.2022.293314.1603](https://doi.org/10.48301/KSSA.2022.293314.1603)



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



طراحی کنترل کننده تکمیلی میراساز در سیستم‌های VSC HVDC برای بهبود تبدیل انرژی توربین‌های بادی و پایداری سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش

ناصر طاهری^{۱*}، احسان اکبری^۲، نعمت‌الله عسکری^۳، وزیر احمد تاجیک^۴، حامد عروجلو^۵، علی محمد کاظمی^۶، قربان قاسمی^۷

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.
- ۳، ۵، ۶- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۴- گروه کامپیوتر و فناوری اطلاعات، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.
- ۷- استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اتصال توربین‌های بادی به شبکه‌های قدرت بدون تأثیرگذاری منفی بر پایداری سیستم، یکی از مهم‌ترین معضلات آتی گسترش نفوذ مزارع بادی در سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود. در این مقاله با هدف بهبود پایداری شبکه قدرت، میراسازی نوسانات ناشی از مدهای کششی و افزایش بازدهی تبدیل انرژی در توربین‌های بادی استراتژی کنترلی جدیدی برای حلقه کنترل توان اکتیو توربین بادی و همچنین سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا پیشنهاد می‌گردد. ابتدا نشان داده می‌شود که منحنی غیرخطی سرعت-توان توربین بادی بر ضریب میرایی مدهای کششی و در نتیجه آن بر بازدهی تبدیل انرژی و پایداری توربین بادی مؤثر است. بر همین اساس استفاده از پادارساز توربین بادی در حلقه کنترل توان توربین بادی پیشنهاد می‌گردد. از آنجا که نیروگاه بادی بر سیلان مؤلفه‌های توان اکتیو-راکتیو مؤثر است؛ از این رو برای بهبود پروفیل ولتاژ و پایداری دینامیکی شبکه قدرت، استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی پادارساز در مبدل یک‌سوکندنه سیستم VSC HVDC پیشنهاد می‌گردد. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، از کنترل‌کننده‌های PID مرتبه کسری استفاده خواهد شد که ضرایب آنها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش تنظیم می‌شوند. در این الگوریتم به دلیل اجتناب از هم‌گرایی سریع خفاش‌ها به اکستریم‌های محلی و توسعه بهینه فضای جست‌وجو، از دو عملگر جهش دینامیکی مبتنی بر احتمالات و ترکیب الگوریتم ژنتیک استفاده خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت استراتژی کنترلی پیشنهادی پایداری سیستم و پروفیل ولتاژ در شبکه به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

کلید واژگان:

پایداری سیستم قدرت
سیستم VSC HVDC
کنترل‌کننده میراساز PID مرتبه کسری
الگوریتم ژنتیک-خفاش
توربین‌های بادی
مدهای کششی

*نویسنده مسئول: ناصر طاهری
پست الکترونیکی:
ntaheri@tvu.ac.ir



©2022 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

افزایش تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی هم‌زمان با ضرورت توجه به ملاحظات زیست‌محیطی باعث رشد قابل توجه استفاده از منابع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت شده است [۳-۱]. سیاست‌های کربن‌زدایی بخش انرژی در کنار کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر، نفوذ این منابع را تقویت کرده است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد از حیث در دسترس بودن، تکنولوژی ساده بهره‌برداری، فضای موردنیاز برای احداث نیروگاه‌ها و گسیل کمترین آلاینده‌ها بیشتر مورد توجه مهندسين برق بوده است.

باید توجه داشت که نیروگاه‌های بادی دارای ساختار و ترکیب‌بندی متفاوتی با نیروگاه‌های کلاسیک هستند. نداشتن قطعیت و نبود ثبات در توان تولیدی این نیروگاه‌ها نه تنها بر پایداری شبکه قدرت مؤثر است بلکه می‌تواند هزینه‌های مدیریت توان و کنترل انرژی را نیز افزایش دهد [۴؛ ۵]. از آنجا که نیروگاه‌های بادی، اینرسی شبکه را کاهش می‌دهند، افت فرکانس در سیستمی که از نفوذ بالای نیروگاه‌های بادی برخوردار است، بیشتر خواهد بود [۶؛ ۷]. ضمن اینکه تحریک مودهای کششی توربین بادی می‌تواند به مؤلفه‌های مداری (ولتاژ-فرکانس) شبکه منتقل شود و از این طریق تأثیر منفی بر تثبیت این مؤلفه‌ها داشته باشد. بر همین اساس نفوذ گسترده مزارع بادی تولید توان الکتریکی در سیستم‌های قدرت، نگرانی‌هایی را برای اپراتورهای سیستم‌های انتقال ایجاد کرده است [۸-۱۰]. صاحبان صنایع قدرت تلاش می‌کنند تا ملزومات و استانداردهای لازم برای تجمیع نیروگاه‌های بادی و سیستم‌های قدرت را طراحی و به کار گیرند.

سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ^۱ از قابلیت انتقال توان الکتریکی در مسافت‌های طولانی با کمترین افت ولتاژ و تلفات برخوردار هستند. به کارگیری VSC‌ها در سیستم‌های HVDC مزیت‌هایی نظیر افزایش ظرفیت انتقال توان با کمترین هزینه، بهبود قابلیت اطمینان، ارتقای کیفیت توان و تقویت سطح ایمنی (از طریق کنترل و حفاظت‌های تعریف شده در مبدل‌ها) را به همراه دارد. علاوه بر این امکان کنترل مستقل و سریع مؤلفه‌های توان در VSC HVDC فراهم می‌شود و از این طریق می‌توان پشتیبانی لازم از ولتاژ-فرکانس شبکه ac را فراهم کرد [۱؛ ۲]. سیستم‌های HVDC مانند سدی در برابر اغتشاشات به‌وجود آمده در سیستم قدرت عمل می‌کنند و مانع از انتشار این اغتشاشات در کل سیستم خواهند شد. به کارگیری این سیستم‌ها به همراه نیروگاه‌های بادی، شرایط را برای کنترل مؤثر سیلان مؤلفه‌های توان و همچنین بهبود حاشیه پایداری کل سیستم قدرت مهیا می‌سازد.

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه به کارگیری سیستم‌های HVDC به همراه مزارع بادی با هدف بهبود پایداری دینامیکی و گذرای مجموعه سیستم قدرت ارائه شده است. در مرجع [۱۱]، نویسندگان استراتژی کنترلی مبتنی بر خازن‌های مجازی ظرفیت بالا در سمت DC سیستم HVDC پیشنهاد می‌کنند که براساس آن اینرسی شبکه اصلی، افزایش پیدا می‌کند و این امر می‌تواند بر بهبود حاشیه پایداری دینامیکی سیستم قدرت مؤثر باشد. در مرجع مذکور، تغییر شرایط کاری توربین بادی و اثر آن بر مودهای کششی بررسی نشده است. در مرجع [۱۲] طراحی کنترل‌کننده‌های ولتاژ براساس الگوریتم تکاملی پیشنهادی (الگوریتم یادگیری آموزشی تعاملی) در سیستم‌های HVDC که رابط نیروگاه بادی فراساحلی^۲ به شبکه ac است، انجام شده است. نویسندگان نشان داده‌اند که با تنظیم مناسب کنترل‌کننده‌های محلی در مبدل‌های سیستم HVDC بر اساس تابع هزینه پیشنهادی می‌توان علاوه بر تنظیم ولتاژ، حاشیه پایداری دینامیکی سیستم قدرت را ارتقا داد. در مدل‌سازی انجام شده اثرگذاری کنترل پیشنهادی بر مودهای کششی توربین‌ها بررسی نشده است. در مرجع [۱۳] نویسندگان اشاره کرده‌اند که اثرگذاری نیروگاه‌های بادی بر کنترل مؤثر فرکانس و بهبود پایداری سیستم قدرت اصلی ناچیز است؛ زیرا این دو سیستم عملاً به‌طور مستقل و مجزا فعالیت می‌کنند. در مقاله

¹ Voltage Source Converter (VSC) based on High Voltage Direct Current (HVDC)

² Offshore Wind Farm

مذکور، نویسندگان طرح کنترلی را پیشنهاد می‌کنند که بر اساس آن امکان مشارکت نیروگاه بادی بر کنترل فرکانس شبکه اصلی از طریق ارتباط ولتاژ شبکه DC و تغییرات فرکانس شبکه ac فراهم می‌شود. اثرگذاری منحنی مشخصه سرعت- توان بر عملکرد کنترل کننده‌های پیشنهادی در این مرجع بررسی نشده است. در مرجع [۱۴] اشاره می‌شود که بدون طراحی کنترل کننده‌های تکمیلی، نیروگاه‌های بادی امکان مشارکت در میراسازی نوسانات ولتاژ شبکه ac را نخواهند داشت. بر همین اساس استفاده از یک کنترل دراپ مبتنی بر نسبت ولتاژ به جریان DC، در سیستم HVDC استفاده می‌شود تا امکان کنترل نوسانات ولتاژ در سمت اینورتر سیستم HVDC فراهم گردد. با این حال اثرگذاری کنترل پیشنهادی بر پایداری دینامیکی و میراسازی نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت بررسی نشده است. در مرجع [۱۵] نویسندگان سطح جریان اتصال کوتاه، طول خط انتقال DC و پهنای باند کنترل لینک DC را سه عامل مؤثر بر عملکرد پایدار سیستم انتقال HVDC به همراه نیروگاه بادی فراساحلی معرفی می‌کنند. با این حال در این مطالعه، طراحی کنترل کننده‌های تکمیلی پایدارساز و همچنین اثرگذاری فاکتورهای مذکور بر مودهای نوسانی و میراسازی آنها بررسی نشده است. در مرجع [۱۶] نویسندگان استفاده از ذخیره کننده انرژی در طرفین لینک DC سیستم HVDC به منظور ذخیره سازی انرژی مازاد توربین بادی فراساحلی را پیشنهاد کرده‌اند. اگرچه ساختار پیشنهادی باعث می‌شود تا توربین بادی در بیشینه نقطه توان خود فعالیت کند با این حال به کارگیری عنصر ذخیره کننده انرژی می‌تواند سنگین شدن نیروگاه بادی فراساحلی و افزایش هزینه‌های اجرا را نتیجه دهد. در مرجع [۱۷] مدار تعادلی ولتاژ برای تنظیم ولتاژ DC تولید شده در واحدهای مجزای نیروگاه بادی پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی حتی در زمانی که سرعت باد در توربین‌های مختلف نیروگاه متفاوت است، تنظیم ولتاژ را به انجام می‌رساند. اجرای عملی این طرح، افزایش پیچیدگی سیستم را به همراه دارد و مطالعات پایداری را با مشکل مواجه می‌کند.

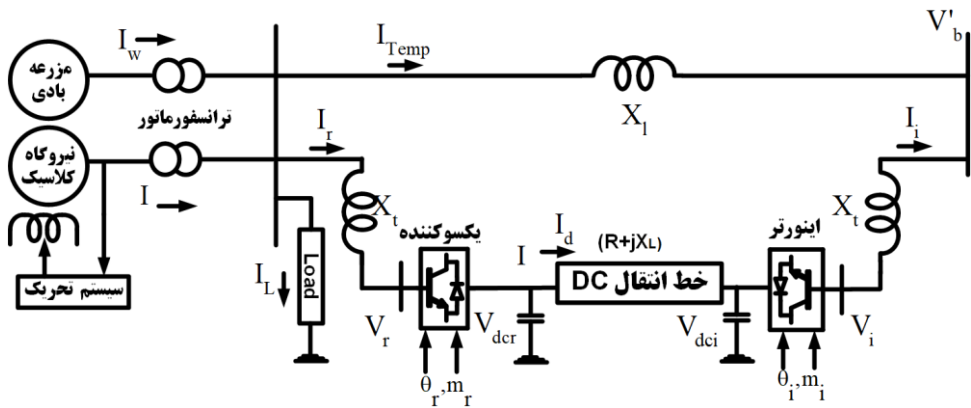
در این مقاله ابتدا مدل سازی دینامیکی یک سیستم قدرت شامل نیروگاه‌های کلاسیک، نیروگاه بادی و سیستم‌های انتقال VSC HVDC انجام می‌شود. سپس استراتژی کنترلی (شامل سه حلقه کنترلی مجزا) پیشنهاد می‌شود که تضمین کننده عملکرد پایدار سیستم ac و نیروگاه بادی در شرایط کاری مختلف است. حلقه کنترلی پایدارساز توربین بادی بر اساس نقاط کاری توربین و منحنی مشخصه سرعت- توان در توربین بادی طراحی می‌شود. نشان داده می‌شود که به ازای نقاط کاری مختلف توربین بادی، ضریب میرایی مودهای کششی متغیر خواهد بود و به کارگیری کنترل کننده پایدارساز توربین بادی برای تقویت گشتاور میرایی و میراسازی نوسانات مودهای کششی، ضروری است. سپس دو حلقه کنترلی مجزا برای تقویت ضریب میرایی مودهای نوسانی سیستم قدرت از طریق میدل یک سوکننده VSC HVDC پیشنهاد می‌شود. این کنترل کننده‌ها وظیفه تقویت پایداری دینامیکی سیستم قدرت را بر عهده خواهند داشت. کنترل کننده‌های تکمیلی در این مقاله از نوع کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری^۱ می‌باشند که ضرایب آنها با استفاده از الگوریتم تکاملی پیشنهادی ژنتیک- خفاش^۲ تنظیم شده‌اند. در الگوریتم پیشنهادی، نوسانات محدود خفاش‌ها که می‌تواند همگرایی به اکستریم‌های محلی را نتیجه دهد، اصلاح می‌شود. این اصلاح از طریق به کارگیری اپراتورهای جهش و ترکیب الگوریتم ژنتیک به صورت احتمالی و توسعه بهینه فضای جست‌وجوی خفاش‌ها حاصل خواهد شد. برای دستیابی به اهداف این مقاله، در بخش دوم، مدل سازی سیستم قدرت انجام می‌شود. در بخش سوم، ساختار کنترل پیشنهادی ارائه می‌گردد و بر همین اساس طراحی کنترل کننده PID با مرتبه گام کسری از طریق الگوریتم پیشنهادی خفاش- ژنتیک در بخش چهارم تشریح می‌شود. در بخش پنجم این مقاله نتایج شبیه سازی سیستم تحت مطالعه به همراه کنترل کننده‌های پیشنهادی در نرم افزار MATLAB انجام می‌شود و نتایج تجزیه و تحلیل می‌گردند. در بخش انتهایی نیز نتایج این تحقیق مرور خواهند شد.

¹ Fractional Order PID(FOPID) Controllers

² Bat-Genetic Algorithm (BGA)

مدلسازی سیستم قدرت تحت مطالعه

در شکل ۱ سیستم قدرت تحت مطالعه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود سیستم قدرت تحت مطالعه دربردارنده خطوط انتقال جریان متناوب ولتاژ بالا و VSC HVDC به همراه نیروگاه های بادی و کلاسیک است. متغیرهای V_r, V_i, V_b, V' و به ترتیب نشان دهنده ولتاژ باس بی نهایت، ولتاژ سمت اینورتر، ولتاژ سمت یک سوکننده و ولتاژ ترمینال نیروگاهها هستند. متغیرهای X_t و X_i به راکتانس های خط ac و ترانس های کوپلینگ نیروگاهها اشاره می کنند. جریان های $I_w, I, I_{Temp}, I_r, I_i, I_L$ به ترتیب جریان بار، جریان خارج شده از اینورتر، جریان ورودی یک سوکننده، جریان خط ac، جریان تزریق شده توسط نیروگاه کلاسیک و جریان تزریقی مزرعه بادی به شبکه قدرت هستند. متغیرهای M_i, θ_i و M_r, θ_r اشاره به زاویه و اندیس مدولاسیون یک سوکننده (r) و اینورتر (i) دارند. مزرعه بادی متشکل از توربین بادی با سرعت ثابت و ژنراتور القایی قفس سنجایی است. مجموعه $E'_{fd}, E'_{q}, \delta, \omega, E'_{wd}, E'_{wq}, V_{dcr}, I_d, V_{dci}$ ، s, θ_g و به عنوان متغیرهای حالت سیستم در نظر گرفته می شوند. متغیرهای $U_{pss}, T_w, M_i, \theta_i, M_r, \theta_r$ به عنوان سیگنال های ورودی تعریف می شوند. مدل سازی این سیستم براساس روش پیشنهاد شده در مراجع [۲؛ ۱] انجام می شود. کلیه پارامترها و ثابت های به کاررفته در مدل سازی، در پیوست مقاله آورده شده است.



شکل ۱. سیستم قدرت تحت مطالعه

رابطه ۱ توصیف کننده عملکرد خط انتقال DC در شکل ۱ است.

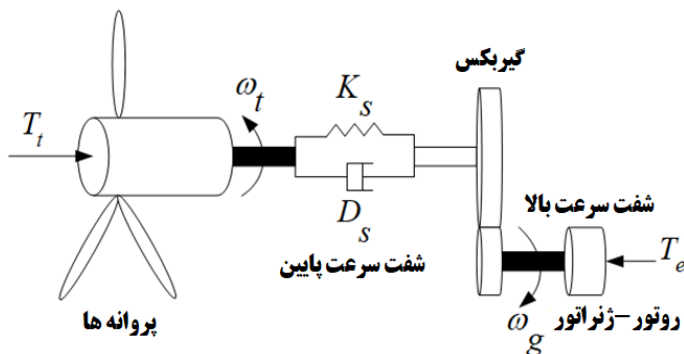
$$\begin{aligned} \Delta V_{dci} &= \frac{1}{C} \{ C_{75} \Delta \delta + C_{74} \Delta V_{dci} + C_{73} \Delta m_i + C_{72} \Delta \theta_i + \Delta I_d \} \\ \Delta I_d &= \frac{1}{L} \{ \Delta V_{dcr} - R \Delta I_d - \Delta V_{dci} \} \\ \Delta V_{dcr} &= \frac{1}{C} \{ C_{56} \Delta \delta + C_{53} \Delta E'_{q'} + C_{59} \Delta E'_{wd} + C_{58} \Delta E'_{wq} + C_{57} \Delta V_{dcr} + C_{54} \Delta m_r - \Delta I_d + C_{55} \Delta \theta_r \} \end{aligned} \quad (1)$$

مدل خطی شده نیروگاه کلاسیک که دربردارنده ژنراتور سنکرون می باشد را نیز می توان به صورت زیر استخراج کرد [۲]:

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= \omega_t \Delta \omega \\ \Delta \omega &= \frac{1}{M} \{-C_{81} \Delta \delta - C_{78} \Delta E'_q - D \Delta \omega - C_{82} \Delta E'_{wd} - C_{83} \Delta E'_{wq} - C_{79} \Delta m_r - C_{80} \Delta \theta_r\} \\ \Delta E'_q &= \frac{1}{T_{do}} \{\Delta E_{fd} - (X_d - X'_d)(C_{19} \Delta E'_q + C_{20} \Delta m_r + C_{21} \Delta \theta_r + C_{22} \Delta \delta + C_{23} \Delta E'_{wq} + C_{24} \Delta E'_{wd}) - \Delta E'_q\} \\ \Delta E_{fd} &= \frac{1}{T_A} \{-K_A C_{90} \Delta \delta - K_A C_{87} \Delta E'_q - \Delta E_{fd} - K_A C_{19} \Delta E'_{wd} - K_A C_{92} \Delta E'_{wq} + K_A \Delta U_{PSS} - K_A C_{88} \Delta m_r - K_A C_{89} \Delta \theta_r\} \end{aligned} \quad (2)$$

بخش مکانیکی توربین بادی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل θ_g جابه‌جایی زاویه‌ای روتور، ω_t ، ω_g و H_t و H_g به ترتیب سرعت زاویه‌ای توربین، ژنراتور و ثابت اینرسی متناظر هستند. متغیرهای K و D ثابت‌های میرایی را نشان می‌دهند. همچنین T_t و T_e نیز اشاره به گشتاور توربین و گشتاور الکتریکی دارند. با توجه به شکل ۲ می‌توان نوشت $(\omega_g = (1-S)\omega_{\text{synchronous}})$:

$$\begin{aligned} 2H_t \frac{d\omega_t}{dt} &= T_t - K\theta_{tg} - D(\omega_t - \omega_g) \\ \Delta \omega_t &= \frac{1}{2H_t} \{\Delta T_t - K\Delta\theta_{tg} + D\Delta\omega_t - D\Delta\omega_g\} \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} &= K\theta_{tg} + D(\omega_t - \omega_g) - T_{e-wind} \\ \Delta \omega_g &= \frac{1}{2H_g} \{-\Delta T_{e-wind} + K\Delta\theta_{tg} + D(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g)\} \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۲. بخش مکانیکی توربین بادی

از حالت‌های گذرا و انشعاب سیم‌پیچ‌های میراکننده و استاتور چشم‌پوشی شده است. با در نظر گرفتن E'_w به‌عنوان ولتاژ القا شده در ماشین و I_w به‌عنوان جریان تزریق شده به شبکه از جانب نیروگاه بادی می‌توان برای گشتاور الکتریکی نوشت [۲]:

$$\begin{aligned} T_{e-wind} &= P_{e-wind} \cdot T_{e-wind} = E'_{wd} I'_{wd} + E'_{wq} I'_{wq} \\ \Delta T_{e-wind} &= \Delta E'_{wd} I'_{wd} + E'_{wd} \Delta I'_{wd} + \Delta E'_{wq} I'_{wq} + E'_{wq} \Delta I'_{wq} \end{aligned} \quad (4)$$

برای تجزیه و تحلیل معادلات دینامیکی سیستم قدرت در فضای حالت ضروری است تا مؤلفه‌های جریان تزریق شده، خطی‌سازی شوند. بر اساس مدل ارائه شده در مقالات [۱؛ ۲] می‌توان نوشت:

$$\Delta T_{e-wind} = C_{90} \Delta E'_q + C_{91} \Delta m_r + C_{93} \Delta \theta_r + C_{92} \Delta \delta + C_{88} \Delta E'_{wd} + C_{89} \Delta E'_{wq} \quad (5)$$

رابطه تعادلی زیر توصیف‌کننده ارتباط بین زاویه جابه‌جایی روتور و سرعت زاویه‌ای توری-ژنراتور می‌باشد:

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \omega_t - \omega_g, \Delta \theta_{tg} = \Delta \omega_t - \Delta \omega_g \quad (6)$$

ولتاژ داخلی ژنراتور القایی در نیروگاه بادی نیز به صورت زیر تشریح می‌شود:

$$\frac{dE'_{wd}}{dt} = \frac{1}{T_o} \{ E'_{wd} - (X_w - X'_w) I_{wq} \} + S \omega_s E'_{wq} \quad (7)$$

$$\frac{dE'_{wq}}{dt} = \frac{1}{T_o} \{ E'_{wq} + (X_w - X'_w) I_{wd} \} - S \omega_s E'_{wd}$$

با خطی‌سازی معادلات فوق حول یک نقطه کاری می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \Delta E'_{wd} &= C_{94} \Delta E'_{wd} + C_{95} \Delta E'_q + C_{96} \Delta m_r + C_{97} \Delta \theta_r + C_{98} \Delta \delta + C_{99} \Delta S + C_{100} \Delta E'_{wq} \\ \Delta E'_{wq} &= C_{106} \Delta E'_{wd} + C_{102} \Delta E'_q + C_{103} \Delta m_r + C_{104} \Delta \theta_r + C_{105} \Delta \delta + C_{107} \Delta S + C_{101} \Delta E'_{wq} \end{aligned} \quad (8)$$

معادلات (۱) - (۸) توصیف‌کننده مدل فضای حالت سیستم قدرت تحت مطالعه هستند.

ساختار کنترلی پیشنهادی

همچنان‌که در رابطه ۳ مشاهده می‌شود، بخش مکانیکی توربین بادی را می‌توان با استفاده از یک سیستم مرتبه سوم مدل‌سازی کرد. این سیستم می‌تواند در بردارنده مودهای نوسانی باشد. این مودها که به‌عنوان مودهای کششی توربین بادی شناخته می‌شوند می‌توانند منجر به اعمال فشارها و تنش‌های مکانیکی به توربین شوند و از این طریق بر توان و فرکانس انرژی الکتریکی تولید شده، مؤثر باشند. بر همین اساس ضروری است تا در طراحی استراتژی‌های کنترلی با هدف بهبود کیفیت توان تولیدی و ارتقای حاشیه پایداری سیستم اثرگذاری این مودها ارزیابی شود. رابطه (۳) که توصیف‌کننده مدل درجه دو زنجیره درایو در توربین بادی است را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta \theta_{tg} + D \left(\frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g} \right) \Delta \theta_{tg} + K \left(\frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g} \right) \Delta \theta_{tg} = \frac{\Delta T_t}{2H_t} + \frac{\Delta T_{e-wind}}{2H_g} \quad (9)$$

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد گشتاور مکانیکی توربین بادی بر اساس سرعت باد تغییر می‌کند. رابطه ۱۰ ارتباط بین توان باد و توان توربین را نشان می‌دهد:

$$P_{t-wind} = P_{wind} C_p(\lambda, \beta), P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (10)$$

که در این رابطه P_{wind} توان به دست آمده از باد، V_w سرعت وزش باد و $C_p(\lambda, \beta)$ تابعی از نسبت سرعت نوک و زاویه پیچ پروانه است. از سویی دیگر، رابطه گشتاور-توان به صورت رابطه ۱۱ توصیف می‌شود:

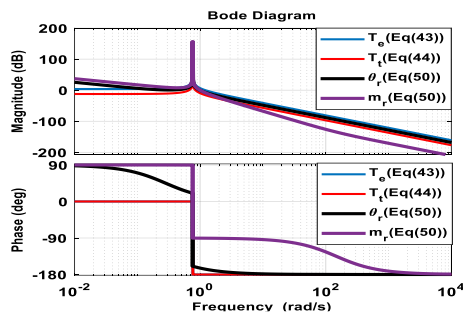
$$T_t = \frac{P_{t-wind}}{\omega_t}, \Delta T_t = \frac{-1}{\omega_t^2} P_{t0} \Delta \omega_t + P_{wind0} \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{d\omega_t} \Delta \omega_t \quad (11)$$

بر اساس رابطه (۱۱) ΔT_t تحت تأثیر V_w ، $C_p(\lambda, \beta)$ و λ و عدم قطعیت‌های موجود در وزش باد است. در مود کنترل توان توربین بادی، مرجع توان اکتیو P_{s-ref} با استفاده از منحنی توان-سرعت که در شکل (۳) نشان داده شده است، محاسبه می‌شود. برای توان می‌توان نوشت:

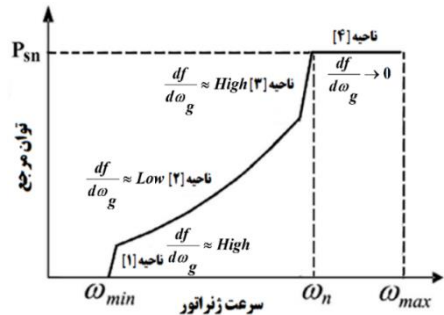
$$T_{e-wind} \cong P_{e-wind-ref} = f(\omega_g) \quad (12)$$

$$\Delta T_{e-wind} \cong \Delta P_{e-wind-ref} = f'(\omega_{g0}) \Delta \omega_g, (f' \equiv \frac{df}{d\omega_g})$$

بر اساس معادله (۹) الی (۱۲) ملاحظه می‌شود که گشتاور الکتریکی (که خود وابسته به مقادیر مرجع توان از منحنی مشخصه سرعت-توان است) بر تحریک مدهای کششی توربین بادی مؤثر است. مؤلفه ΔT_e می‌تواند مؤلفه‌ای میراکننده هم‌راستا با سرعت ژنراتور و متناسب با $df/d\omega_g$ (تغییرات منحنی مشخصه سرعت-توان نسبت به سرعت) تولید کند. از آنجا که منحنی سرعت-توان، تابعی غیرخطی است؛ مدهای کششی توربین بادی نیز بسته به شرایط کاری توربین متفاوت خواهند بود. بر اساس مقادیر $df/d\omega_g$ در نمودار شکل ۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که گشتاور الکتریکی در نواحی (۱) و (۳)، میرایی مناسبی را برای مدهای کششی توربین فراهم می‌کند. در همین حال مقدار میرایی فراهم شده توسط گشتاور الکتریکی در نواحی (۲) و (۴) ناچیز است. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار میرایی فراهم شده توسط گشتاور الکتریکی در نواحی کاری مختلف توربین بادی یکسان نیست و در طراحی کنترل کننده این مهم باید در نظر گرفته شود.



شکل ۴. دیاگرام بود برای توابع تبدیل استخراج شده از رابطه (۱۳)



شکل ۳. منحنی مشخصه سرعت-توان در توربین بادی

با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه (۹) می‌توان نوشت:

$$\Delta\theta_g + D\left(\frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g}\right)\Delta\theta_g + K\left(\frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g}\right)\Delta\theta_{ig} = \frac{\Delta T_t}{2H_t} + \frac{1}{2H_g}(C_{90}\Delta E'_q + C_{91}\Delta m_r + C_{93}\Delta\theta_r + C_{92}\Delta\delta + C_{88}\Delta E'_{wd} + C_{89}\Delta E'_{wq}) \quad (13)$$

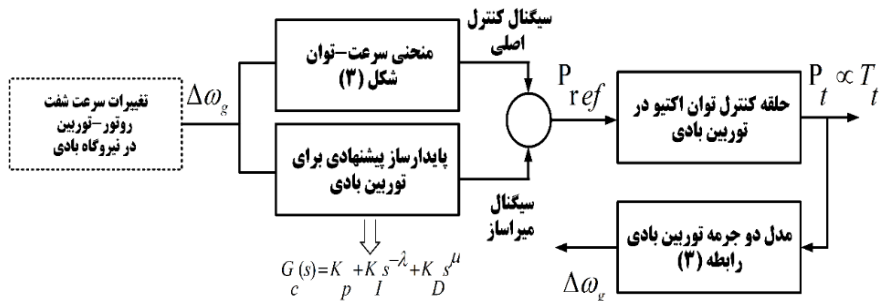
با در نظر گرفتن سیگنال‌های $\Delta\theta_r$ ، Δm_r ، ΔT_{e-wind} و ΔT_t به عنوان ورودی‌های سیستم، توابع تبدیل مشتق شده از رابطه (۱۳) به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\Delta\theta_{ig}}{\Delta T_{e-wind}} = \frac{\frac{1}{2H_g}}{s^2 + A's + B'} \quad , \quad (A' = \frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g} \quad , \quad B' = \frac{1}{2H_t} + \frac{1}{2H_g}) \quad (14)$$

$$\frac{\Delta\theta_{ig}}{\Delta T_t} = \frac{\frac{1}{2H_t}}{s^2 + A's + B'} \quad (15)$$

مشخصه حوزه فرکانسی روابط (۱۴) و (۱۵) در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج زیر از این شکل به دست می‌آید:

- گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی در توربین بادی بر روی نوسانات مودهای کششی، تأثیرگذار هستند (روابط (۱۱) الی (۱۳)).
- بهره دامنه زنجیره درایو در نزدیکی فرکانس تشدید به طور قابل توجهی بالا است. بر همین اساس هر گونه تغییر در سیگنال‌های ΔT_t ، ΔT_e ، Δm_r ، $\Delta\theta_r$ می‌تواند مودهای کششی زنجیره درایو را تحریک کنند.
- دامنه ΔT_{e-wind} در فرکانس تشدید، بزرگ‌تر از ΔT_t است؛ از این رو تنش‌های اعمالی به شفت توربین ناشی از تغییر این مؤلفه نسبت به مؤلفه گشتاور توربین بیشتر است.
- برای نواحی دوم و چهارم در شکل (۳) مقدار $df/d\omega_g$ پایین است؛ بنابراین گشتاور میرایی حاصل از ΔT_e wind ضعیف خواهد بود. به عبارتی دیگر در این ناحیه، مودهای کششی توربین، میرایی ضعیفی دارند.
- با توجه به مورد (۴) و به منظور تقویت گشتاور میرایی، طراحی یک کنترل کننده پایدارساز در توربین بادی پیشنهاد می‌شود. این کنترل کننده در شکل (۵) نشان داده شده است.
- روابط (۱) و (۷) نشان می‌دهند که سیگنال‌های Δm_r ، $\Delta\theta_r$ (ورودی‌های کنترلی یک سوکننده) بر روی سیگنال گشتاور الکتریکی هر دو نیروگاه بادی و کلاسیک تأثیرگذار هستند. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود تا از یک کنترل کننده تکمیلی در سیستم VSC HVDC برای بهبود پایداری کل سیستم استفاده شود. در ادامه مقاله این کنترل کننده با جزئیات بیشتری بررسی خواهد شد.



شکل ۵. نمایش بلوک دیگرام کنترل پیشنهادی برای توربین بادی

مهم‌ترین هدف از طراحی کنترل کننده تکمیلی میراساز در سیستم انتقال HVDC بهبود پایداری دینامیکی کل سیستم قدرت است. بر همین اساس لازم است تا کنترل کننده‌های طراحی شده هماهنگ با کنترل کننده‌های میراساز طراحی شده در توربین‌های بادی فعالیت کنند.

بر اساس روابط (۱) تا (۹) سیگنال‌های ورودی یک سوکننده در سیستم انتقال HVDC مؤثر بر گشتاور (توان) تولید شده در نیروگاه‌های کلاسیک و بادی هستند. به عبارتی، می‌توان نوشت (با فرض اینکه η و η' در شرایط کاری مشخص ثابت هستند):

$$\Delta T_e \propto \Delta P_e \propto (\eta \theta_r + \eta' m_r) \quad (16)$$

بنابراین در سیستم انتقال HVDC می‌توان از طریق کنترل سیلان مؤلفه‌های توان و با اعمال سیگنال‌های تکمیلی میراساز در ورودی‌های یک سوکننده حاشیه پایداری سیستم قدرت را بهبود بخشید. برای نوسانات کششی در توربین بادی می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{lg} + A' \Delta \theta_{lg} + B' \Delta \theta_{lg} &= \frac{\Delta T_r}{2H_r} + \frac{\Delta T_{e-wind}}{2H_g} \\ \Delta \theta_{lg} + A' \Delta \theta_{lg} + B' \Delta \theta_{lg} &= \frac{\Delta T_r}{2H_r} + \frac{\Delta T_{e-wind}}{2H_g} \end{aligned} \quad (17)$$

پیشتر نشان داده شد (رابطه (۵)) که $\Delta T_{e-wind} = f(\Delta E'_q, \Delta m_r, \Delta \theta_r, \Delta \omega, \Delta E'_{wd}, \Delta E'_{wq})$. در این رابطه VSC HVDC هستند. با فرض اینکه متغیرهای حالت ثابت (یا قابل کنترل از طریق حلقه‌های کنترل محلی نظیر تنظیم کننده خودکار ولتاژ) هستند، می‌توان رابطه گشتاور الکتریکی در توربین بادی را به صورت زیر نوشت:

$$\Delta T_{e-wind} = \alpha \Delta \theta_r + \alpha' \Delta \theta_r + \beta \Delta m_r + \beta' \Delta m_r + g(\Delta E'_q, \Delta \omega, \Delta E'_{wd}, \Delta E'_{wq}) \quad (18)$$

با ترکیب دو رابطه اخیر می‌توان نوشت:

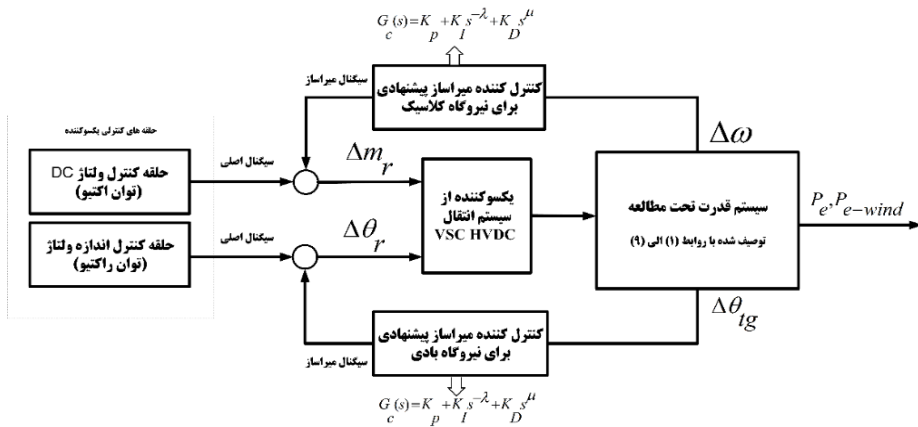
$$\Delta \theta_{lg} + A' \Delta \theta_{lg} + B' \Delta \theta_{lg} = \frac{\Delta T_r}{2H_r} + \alpha \Delta \theta_r + \alpha' \Delta \theta_r + \beta \Delta m_r + \beta' \Delta m_r + g(\Delta E'_q, \Delta \omega, \Delta E'_{wd}, \Delta E'_{wq}) \quad (19)$$

با استفاده از رابطه (۱۹) توابع تبدیل بر اساس ورودی‌های $\Delta m_r, \Delta \theta_r$ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\Delta \theta_{lg}}{\Delta m_r} = \frac{\beta + \beta' s}{S^3 + A' s^2 + B' s} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \theta_{lg}}{\Delta \theta_r} = \frac{\alpha + \alpha' s}{S^3 + A' s^2 + B' s} \quad (21)$$

دیاگرام این رابطه نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. سیگنال‌های ورودی از سیستم VSC HVDC بر روی مودهای کششی سیستم مؤثر هستند و با طراحی یک کنترل کننده کمکی می‌توان به‌طور مؤثری نوسانات حاصل از تحریک این مودها را میرا کرد. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود تا از سیگنال Δm_r برای اعمال سیگنال میراکننده نوسانات سیستم قدرت و از $\Delta \theta_r$ برای میراسازی نوسانات مودهای کششی توربین بادی استفاده کرد. این کنترل کننده‌ها در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. ورودی کنترل کننده پایدارساز در توربین بادی $\Delta \theta_{ig}$ است. خروجی این کنترل کننده به زاویه فاز مدولاسیون در یک سوکننده اعمال می‌شود. وظیفه این کنترل کننده، فراهم‌سازی گشتاور میرایی کمکی برای توربین بادی است. در بخش پایدارسازی نیروگاه کلاسیک، دو کنترل کننده میراساز نوسانات مورد استفاده قرار گرفته است که اولین کنترل کننده از تغییرات سرعت دور روتور در ژنراتور سنکرون به عنوان ورودی استفاده می‌کند و سیگنال میراساز محاسبه شده را به ورودی تغییر اندیس مدولاسیون یک سوکننده از سیستم VSC HVDC اعمال می‌کند.



شکل ۶. بلوک دیاگرام کنترل کننده‌های میراساز پیشنهادی

دومین کنترل کننده این بخش از تغییرات زاویه جابه‌جایی شفت توربین در نیروگاه بادی، بازخورد می‌گیرد و سیگنال میراکننده را از طریق ورودی زاویه فاز یک سوکننده به سیستم اعمال خواهد کرد. هر سه کنترل کننده مذکور، هم‌زمان و با استفاده از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری طراحی خواهد شد.

طراحی کنترل کننده PID با مرتبه گام کسری با استفاده از الگوریتم پیشنهادی خفاش-ژنتیک

در این مقاله، طراحی کنترل کننده‌های پیشنهادی برای بهبود تبدیل انرژی و حاشیه پایداری دینامیکی سیستم قدرت با استفاده از کنترل کننده‌های PID انجام می‌شود. در این طراحی، شاخص‌هایی نظیر فراجهش، زمان نشست، زمان صعود و خطای حالت ماندگار تغییرات سرعت روتور در توربین بادی و نیروگاه کلاسیک در نظر گرفته می‌شوند. همچنین انتگرال قدر مطلق خطا^۱ به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی انتخاب شده است:

$$F(x_i, i = 1, 2, \dots, n) = \int_0^{\infty} |y(t)^* - y(t)| dt \quad (22)$$

¹ Integral Absolute Error (IAE)

در این رابطه $y(t)$ خروجی واقعی و $y^*(t)$ مقدار مرجع خروجی هستند. تابع تبدیل برای کنترل کننده PID مرتبه کسری به شکل زیر می‌باشد ($K_p, K_I, K_D, \mu, \lambda$) ضرایب ثابت از کنترل کننده هستند که باید تنظیم شوند) [۱۸]:

$$G_c(s) = K_p + K_I s^{-\lambda} + K_D s^{\mu} \quad (23)$$

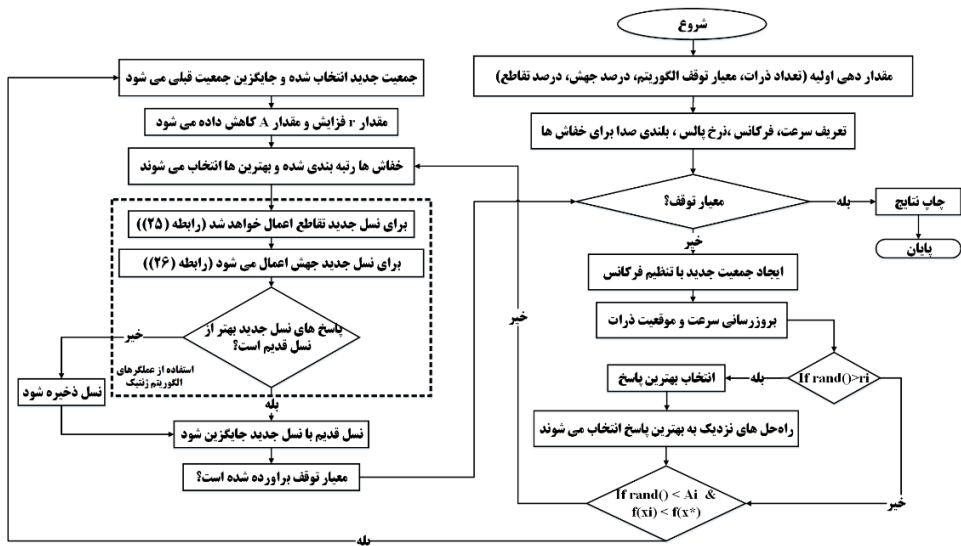
برای طراحی کنترل کننده‌های میراساز (به تعداد $j = 1, 2, 3$) در این مقاله، تابع هدف بر مبنای IAE و به شکل زیر تعریف خواهد شد:

$$J(K_{pj}, K_{Ij}, K_{Dj}, \lambda_j, \mu_j, j = 1, 2, 3) = \int_0^{\infty} (|V' - V_{ref}| + |\Delta \omega_g| + |\Delta \omega| + |\Delta \theta_{ig}|) dt \quad (24)$$

ولتاژ ترمینال $V' - V_{ref}$ تابع هدف به کار گرفته شده است تا از تنظیم آن در ترمینال‌های هر یک از نیروگاه‌ها اطمینان حاصل شود. ضرایب کنترل کننده‌ها با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-خفاش تنظیم می‌شوند. یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های ابتکاری و تکاملی، استفاده از راه‌حل‌های احتمالی برای بهینه‌سازی مسئله مورد مطالعه است. در مورد به کارگیری الگوریتم‌های تکاملی دو نکته زیر حائز اهمیت خواهند بود [۱۹؛ ۲۰]:

- اگر فضای جست‌وجوی متغیر گسترده انتخاب شود، در این صورت زمان جست‌وجوی راه‌حل قابل توجه خواهد بود.
- در فضای جست‌وجوی گسترده اگرچه احتمال دسترسی به راه‌حل‌ها افزایش خواهد یافت با این حال این راه‌حل‌ها الزاماً راه‌حل بهینه نیستند.

بر همین اساس ضروری است تا مصالحه‌ای بین فضای جست‌وجوی گسترده و سرعت هم‌گرایی به پاسخ‌های بهینه فراهم شود.



شکل ۷. نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی خفاش-ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی

الگوریتم خفاش^۱ بر اساس سیستم ردیابی خفاش طراحی شده است [۲۱]. این الگوریتم از تنظیم فرکانس برای توسعه فضای جست‌وجو استفاده می‌کند و با داشتن شاخص‌هایی چون میزان‌سازی فرکانس، بزرگ‌نمایی خودکار و کنترل پارامترها قادر به ارائه راه‌حل بهینه برای مسائل غیرخطی و مقیاس بالا است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های BA همگرایی سریع در مراحل ابتدایی الگوریتم به‌وسیله سویچ از اکتشاف به استخراج است که البته همین امر باعث می‌شود تا بعد از چند مرحله ابتدایی، الگوریتم دچار رکود شود و احتمال به دام افتادن در نقاط اکسترمم محلی افزایش یابد [۲۲]. بر همین اساس در این تحقیق پیشنهاد می‌شود تا از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک برای ارتقای سرعت و دقت همگرایی خفاش‌ها به شرح ذیل استفاده شود:

- ۱- ابتدا خفاش‌ها بر اساس تابع هزینه مرتب‌سازی می‌شوند.
- ۲- عملیات تقاطع^۲ در الگوریتم ژنتیک به‌صورت زیر بر روی دو خفاش (اولین خفاش دارای بهترین تابع هزینه و دومین خفاش به‌صورت تصادفی از بین جمعیت اولیه انتخاب می‌شود) اجرا می‌شود (x_k^1, x_k^2) اشاره به والدین و (y_k^1, y_k^2) اشاره به نسل فرزندان دارند):

$$\begin{aligned} \alpha x_k^1 + (1-\alpha)x_k^2 &= y_k^2 \\ \alpha x_k^2 + (1-\alpha)x_k^1 &= y_k^1 \end{aligned} \quad (25)$$

رابطه (۲۵) تقاطع ژن‌های مختلف در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد که منجر به ایجاد خفاش‌های جدید خواهد شد.

- ۳- برای اجتناب از گیرکردن در اکسترمم‌های محلی نسل منتج استفاده از جهش دینامیکی^۳ پیشنهاد می‌شود. جهش دینامیکی در الگوریتم پیشنهادی به شرح ذیل انجام می‌شود (منظور از σ , rand، y^{\min} و y^{\max} به ترتیب یک عدد تصادفی، پارامتری ثابت تعریف شده توسط اپراتور، بیشینه و کمینه مقدار متغیر است):

$$x_j = \begin{cases} y_j + (y^{\max} - y_j)(\text{rand}())^{(1-\sigma)} & \text{rand} < 0.5 \\ y_j - (y_j - y^{\min})(\text{rand}())^{(1-\sigma)} & \text{rand} > 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

بر اساس رابطه (۲۶) نسل جدید از خفاش‌ها بر اساس نوسانات جزئی حول نسل قدیم ایجاد خواهد شد. به عبارتی دیگر دامنه فضای جست‌وجو در مورد مقادیر بهینه توسعه داده می‌شود. این امر می‌تواند مانع از به دام افتادن الگوریتم در اکسترمم‌های محلی شود.

اگر خفاش جهش یافته دارای پاسخ بهتری نسبت به خفاش نسل قبلی باشد، در این صورت حرکت کلی ذرات به سمت موقعیت خفاش بهتر هدایت می‌شود. در شکل (۷) الگوریتم پیشنهادی ژنتیک- خفاش نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی

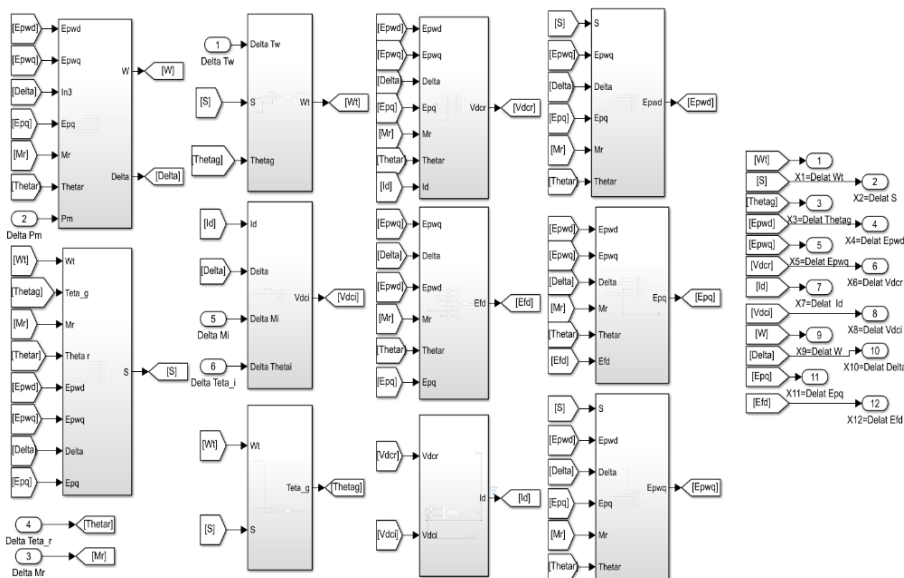
در این بخش، استراتژی کنترلی پیشنهادی برای VSC HVDC با هدف بهبود تبدیل انرژی و همچنین پایداری دینامیکی سیستم قدرت از طریق شبیه‌سازی یک سیستم نمونه در نرم‌افزار MATLAB اعتبارسنجی خواهد شد. کلیه

¹ Bat Algorithm (BA)

² Crossover

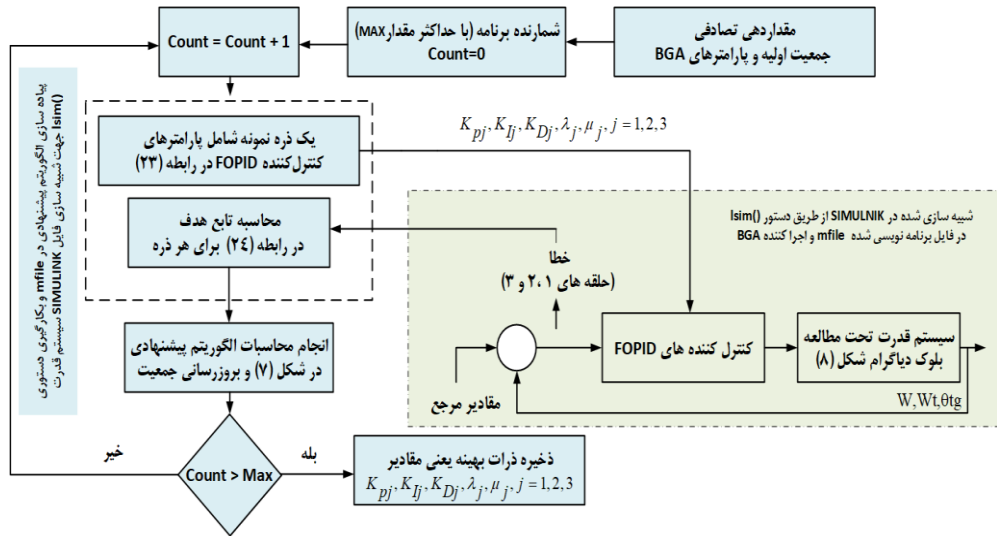
³ Dynamic Mutation

پارامترهای مربوط به مدل سازی سیستم قدرت و همچنین الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی ژنتیک- خفاش در پیوست مقاله آورده شده است. جعبه ابزار مناسب برای به کارگیری الگوریتم های تکاملی ترکیبی در محیط نرم افزاری MATLAB وجود ندارد؛ از این رو الگوریتم ژنتیک- خفاش برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PID گام کسری از طریق m-file نویسی و به صورت برون خط^۱ اجرا شده است (شکل های ۸ و ۹). در شکل ۸ بلوک های سیستم قدرت در محیط MATLAB/SIMULINK نشان داده شده است. شکل ۸-الف سیستم قدرت مدلسازی شده را نشان می دهد. در شکل ۸-ب چگونگی قرارگیری کنترل کننده های FOPID سیستم VSC HVDC را نشان می دهد. سیستم حول یک نقطه کاری خطی سازی شده است؛ بنابراین تغییرات هر یک از متغیرها نسبت به مقادیر اصلی، اندازه گیری می شود. در شکل (۹) نحوه محاسبه ضرایب کنترل کننده های FOPID نشان داده شده است. در ابتدا پخش بار سیستم در یک شرایط کاری مشخص صورت می گیرد و فضای حالت سیستم مطابق با معادلات (۱) تا (۹) محاسبه می شود. داده های پخش بار در محیط SIMULINK بارگذاری می گردند و پارامترهای الگوریتم BGA مقادیر اولیه می شوند. هر یک از ذرات در این الگوریتم شامل ۱۵ بعد است که عبارتند از: $\lambda_j, \mu_j, j = 1, 2, 3$ از طریق mfile اجراکننده الگوریتم BGA (شکل ۷) و با استفاده از دستور Isim هر یک از ذرات در داخل بلوک های کنترل کننده در SIMULINK قرار داده و سیستم قدرت (شکل ۸-ب) اجرا می شود. خاطر نشان می شود که بلوک های کنترل کننده FOPID در شکل (۸-ب) با استفاده از جعبه ابزار پیشنهادی در مراجع [۲۲؛ ۲۳] (برای محاسبات کسری در نرم افزار MATLAB-SIMULINK) پیاده سازی شده اند. این جعبه ابزار از طریق مرجع [۲۴] قابل دسترسی است. با اجرای سیستم قدرت، تابع هزینه (رابطه ۲۴) برای هر یک از ذرات محاسبه می گردد. بر اساس توابع هزینه محاسبه شده، موقعیت ذرات به روز رسانی می شود. این عمل تا رسیدن به آخرین تکرار ادامه می یابد. ذرات به دست آمده در آخرین تکرار ذخیره می گردند و به عنوان بهترین ضرایب کنترل کننده های پیشنهادی برای شبیه سازی نهایی سیستم قدرت به کار گرفته می شوند.



(الف) بلوک دیاگرام سیستم قدرت مورد مطالعه (شبیه سازی شده در SIMULINK)

¹ Offline

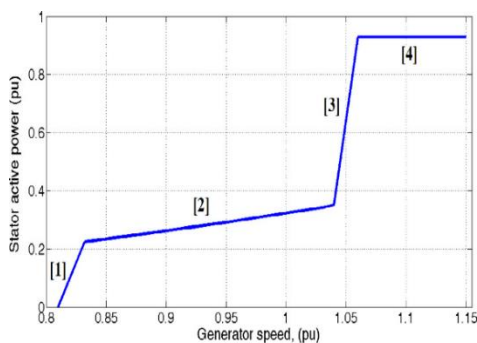


شکل ۹. چگونگی به کارگیری الگوریتم BGA به منظور تصحیح پارامترهای کنترل کننده های FOPID

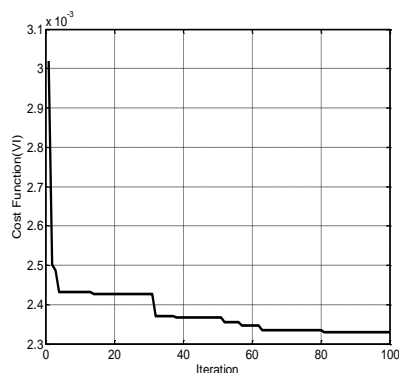
تغییرات توان مکانیکی ورودی به توربین در ژنراتور سنکرون به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است. کنترل کننده های پیشنهادی در این تحقیق با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش و در شرایط کاری نامی سیستم قدرت طراحی خواهند شد. تابع هزینه که در حین تنظیم پارامترهای کنترل کننده های میراساز کمینه می شود، در رابطه (۲۳) تشریح شد. براساس رابطه مذکور، کمینه تابع فوق زمانی حاصل خواهد شد که حداقل نوسانات (تغییرات) در سرعت شفت روتور-ژنراتور توربین بادی یا ژنراتور سنکرون وجود داشته باشد و علاوه بر این، درصد تغییرات ولتاژ در ترمینال مشترک نیروگاهها نیز در حداقل مقدار، ممکن باشد. هر خفاش در واقع مجموعه ای از متغیرات $(K_{pj}, K_{Ij}, K_{Dj}, \lambda_j, \mu_j, j = 1, 2, 3)$ برای کنترل کننده های مختلف میراساز است که تابع هزینه متناظر آن از رابطه (۲۳) محاسبه شده است. در جدول ۱ ضرایب بهینه کنترل کننده ها نمایش داده شده است که در واقع متغیرهای خفاش با بهترین تابع هزینه هستند. همچنین شکل ۱۰ کمینه شدن تابع هزینه به ازای اجرای الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش برای دستیابی به مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده ها را نشان می دهد. در شکل ۱۱ یک نمونه از منحنی سرعت-توان توربین بادی نشان داده شده است. کنترل کننده های طراحی شده در سیستم قدرت توصیف شده با معادلات (۱) تا (۹) به کار گرفته می شوند تا عملکرد سیستم قدرت در حضور کنترل کننده های پیشنهادی میراساز بررسی شود. در بخش های قبلی نشان داده شده که مدهای کششی توربین بادی تحت تأثیر منحنی سرعت-توان توربین می باشد و به ازای نواحی مختلف این منحنی، تأثیر مدهای کششی بر عملکرد توربین، یکسان نیست. بر همین اساس شبیه سازی سیستم قدرت تحت مطالعه با حضور کنترل کننده های طراحی شده و در نواحی مختلف منحنی سرعت-توان توربین بادی انجام می شود. در نواحی (۲) و (۴) از منحنی سرعت-توان (شکل های ۳ و ۱۱) ملاحظه شد که گشتاور میرایی الکترومکانیکی به طور مؤثر برای توربین فراهم نمی شود. به عبارتی دیگر ضریب میرایی مدهای نوسانی در این ناحیه پایین است. این امر باعث می شود تا بازدهی تبدیل انرژی و همچنین پایداری توربین بادی تحت تأثیر قرار گیرد و در صورت بروز اغتشاش در سیستم، شاهد بروز نوسانات توان و در نتیجه آن تخریب پروفیل ولتاژ در ترمینال نیروگاهها باشیم.

جدول ۱. مقادیر به دست آمده برای کنترل کننده‌های پیشنهادی

ضرایب	برای VSC HVDC در مسیر اندیس		برای VSC HVDC در مسیر زاویه	
	مدولاسیون	مدولاسیون	حلقه کنترل توان اکتیو توربین بادی	توربین بادی
K_p	۱۱.۶	۱۲.۱۰	۱۰.۹	
K_I	۳۰.۳	۲۹.۳	۲۸.۷	
K_D	۴.۱	۴.۳	۳.۹	
λ	۱.۴۵	۱.۲۲	۱.۲۹	
μ	۱.۱	۰.۹۳	۱.۰۲	



شکل ۱۱. منحنی سرعت-توان در توربین بادی که در شبیه‌سازی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است.

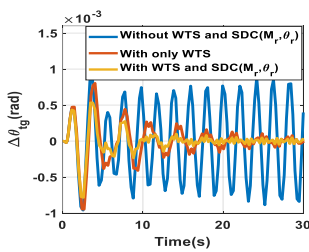


شکل ۱۰. نمودار تابع هزینه رابطه (۲۳) در تکرارهای مختلف الگوریتم پیشنهادی

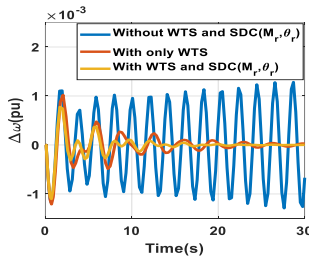
در شکل (۱۲) عملکرد سیستم قدرت در ناحیه دوم منحنی سرعت-توان توربین بادی و به‌ازای سرعت باد مکانیکی در ژنراتور سنکرون ($V_w \approx 8 \text{ m/s}$) مشاهده می‌شود که در ابتدای شبیه‌سازی و با اعمال اغتشاش مربوط به تغییر توان مربوط به تغییرات سرعت روتور (فرکانس) در هر دو نیروگاه بادی و کلاسیک، ولتاژ ترمینال و زاویه بار (در ژنراتور سنکرون) با گذشت زمان، افزایشی و نوسانی است. نوسانات فرکانس بر اساس معادله نوسان تشریح‌کننده عملکرد مکانیکی توربین‌ها ($\frac{d\omega}{dt} \propto (T_m - T_e) \propto (P_m - P_e)$)، نشان‌دهنده تغییرات گشتاورهای (توان‌های) اعمالی به توربین‌ها است. شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) به‌وضوح نشان می‌دهند که در صورت نبود کنترل کننده‌های پایدارساز در توربین بادی، سیستم قدرت، پایداری فرکانس خود را از دست داده است و تبادل توان به‌درستی بین نیروگاه‌ها و شبکه قدرت انجام نمی‌شود. توان بارها و مصرف کننده‌ها در سیستم قدرت تحت مطالعه ثابت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طبق معادل نوسان توان مکانیکی اعمال شده (از سمت توربین‌ها) به روتورها در هر دو نیروگاه دچار تغییر شده و پایداری فرکانس را دستخوش تغییر کرده است. می‌توان ملاحظه کرد که زاویه بار در ژنراتور سنکرون و زاویه جابه‌جایی در نیروگاه بادی (شکل‌های (۱۲-ج) و (۱۲-د)) نیز در صورت نبود کنترل کننده پایدارسازی توربین بادی دچار نوسانات افزایشی شده‌اند که همین امر نوسان در مؤلفه توان را نشان می‌دهد. اگرچه دامنه نوسان ولتاژ در شرایط استفاده نکردن از پایدارساز توربین بادی محدود است با این حال شکل (۱۲-ه) نشان‌دهنده تخریب پروفیل ولتاژ در ترمینال نیروگاه‌ها است. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در صورت استفاده از کنترل کننده پایدارساز پیشنهادی در توربین بادی، سیستم قدرت پایدار

شده است و از نوسانات مؤلفه‌های تغییرات سرعت روتور در نیروگاه‌ها، زاویه بار و زاویه جابه‌جایی به‌طور قابل‌توجهی کاسته شده است. البته پروفیل ولتاژ نیز بهبود یافته و در انتهای زمان شبیه‌سازی، شاهد تثبیت ولتاژ در مقدار نامی هستیم. استفاده از کنترل‌کننده‌های مربوط به VSC HVDC به همراه کنترل‌کننده پایدارساز توربین بادی بهبود بیشتری در عملکرد دینامیکی سیستم قدرت ایجاد کرده است به‌طوری‌که زمان نشست سیگنال‌های تحت مطالعه از ۳۰ ثانیه به حدود تقریبی ۱۵ ثانیه می‌رسد و فراجهدش سیگنال‌ها در زمان ابتدای شبیه‌سازی در حدود ۱۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. در نواحی سوم (و یکم) از منحنی سرعت-توان توربین بادی حساسیت منحنی به تغییرات سرعت نسبتاً بالا است؛ بنابراین کنترل توان اکتیو در ژنراتور می‌تواند میرایی مناسب برای سرعت ژنراتور را فراهم کند.

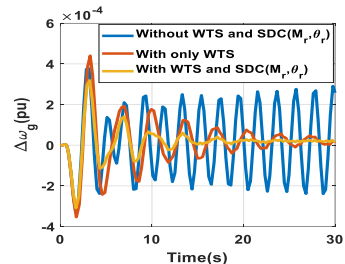
شکل (۱۳) پاسخ سیستم به‌ازای نقطه کاری در ناحیه سوم را نشان می‌دهد ($V_w \approx 12 \text{ m/s}$). ملاحظه می‌شود که در این ناحیه حتی در صورت استفاده نکردن از کنترل‌کننده‌های پایدارساز، پاسخ‌های سیستم پایدار هستند. در واقع گشتاور الکترومغناطیسی میراکننده توسط هر دو ژنراتور فراهم شده است. علاوه بر این فراجهدش در پاسخ‌ها نسبت به پاسخ‌های نمایش داده شده در شکل (۱۱) کمتر است. در ناحیه چهارم منحنی سرعت-توان حساسیت منحنی نسبت به سرعت ژنراتور صفر است؛ از این رو حلقه کنترل توان اکتیو در نیروگاه بادی قادر به فراهم‌سازی گشتاور میرایی مناسب نیست. در شکل (۱۴) پاسخ سیستم به‌ازای یک نقطه کاری از این ناحیه نشان داده شده است ($V_w \approx 14 \text{ m/s}$). با توجه به پاسخ‌ها مشخص است که در صورت استفاده نکردن از کنترل‌کننده‌های پایدارساز گشتاور میرایی موردنیاز فراهم نشده و سیستم به سمت ناپایداری سوق پیدا کرده است. با این حال به‌کارگیری کنترل‌کننده‌ها باعث پایداری سیستم قدرت و تثبیت ولتاژ ترمینال شده است.



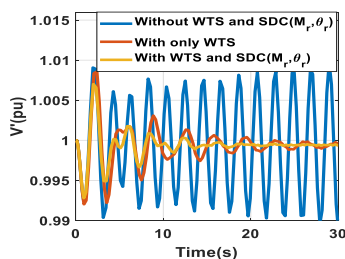
(ج) زاویه جابه‌جایی روتور در توربین بادی



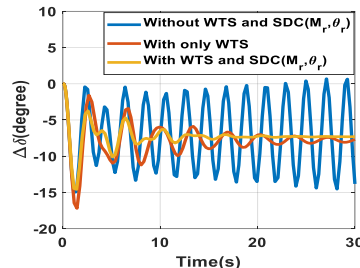
(ب) تغییرات سرعت روتور در ژنراتور سنکرون



(الف) تغییرات سرعت روتور در توربین بادی



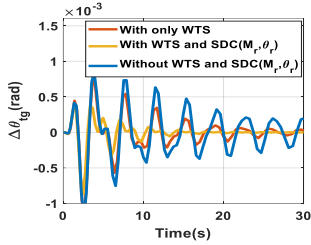
(ه) ولتاژ ترمینال مشترک نیروگاه‌ها



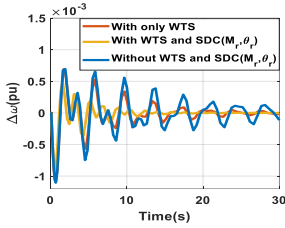
(د) تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون

شکل ۱۲. خروجی‌های سیستم تحت مطالعه به‌ازای فعالیت توربین بادی در ناحیه دوم منحنی

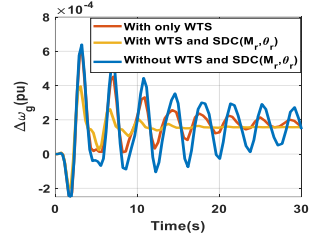
سرعت-توان ($V_w = 8 \text{ m/s}$)



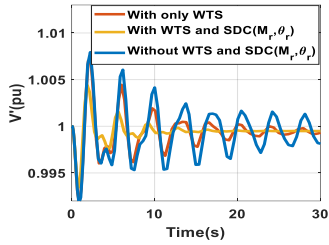
(الف) تغییرات سرعت روتور در توربین بادی



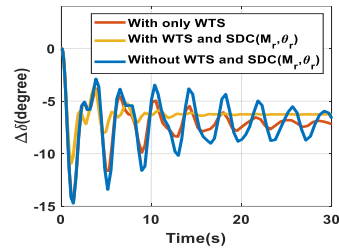
(ب) تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون



(ج) زاویه جابجایی روتور در توربین بادی

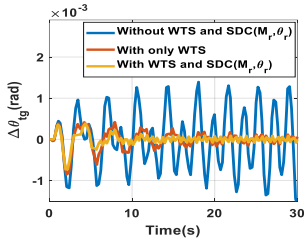


(د) تغییرات بار در ژنراتور سنکرون

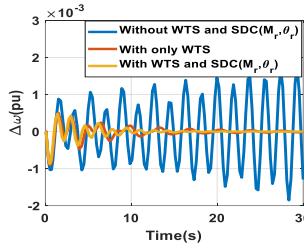


(ه) ولتاژ ترمینال مشترک نیروگاه‌ها

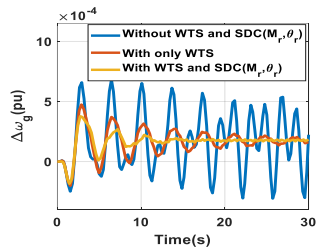
شکل ۱۳. خروجی‌های سیستم تحت مطالعه به‌ازای فعالیت توربین بادی در ناحیه سوم منحنی سرعت - توان ($v_w \approx 12\%$)



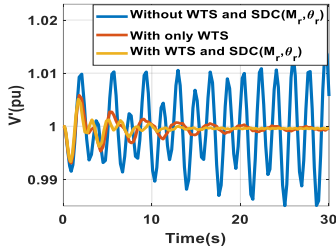
(الف) تغییرات سرعت روتور در توربین بادی



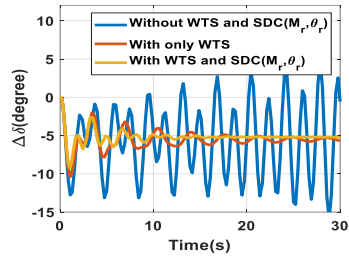
(ب) تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون



(ج) زاویه جابه‌جایی روتور در توربین بادی



(ه) ولتاژ ترمینال مشترک نیروگاهها



(د) تغییرات زاویه بار در ژنراتور

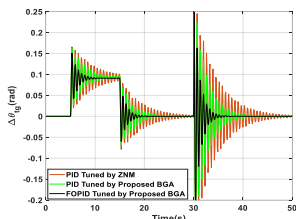
سنکرون

شکل ۱۴. خروجی‌های سیستم تحت مطالعه به ازای فعالیت توربین بادی در ناحیه سوم منحنی سرعت -

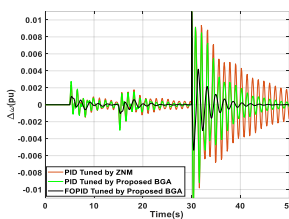
توان ($v_w = 14 \text{ m/s}$)

در شکل ۱۵ پاسخ سیستم قدرت تحت مطالعه به خطای اتصال کوتاه (که به مدت ۷ سیکل و در زمان ۳۰ ثانیه در باس بی‌نهایت ایجاد می‌شود) و همچنین تغییرات سرعت باد (ده درصد تغییر در سرعت باد در زمان‌های ۷ ثانیه الی ۱۵ ثانیه) نشان داده شده است. برای ارزیابی توانایی کنترل‌کننده‌های پیشنهادی تنظیم شده با الگوریتم ژنتیک-خفاش در میراسازی نوسانات فرکانس-توان و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه، پاسخ‌های سیستم با نتایج حاصل از به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های PID کلاسیک و PID تنظیم شده با الگوریتم پیشنهادی BGA مقایسه شده است. ضرایب کنترل‌کننده PID از طریق روش تجربی زیگلر-نیکولز^۱ در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده‌اند. تابع تبدیل کنترل‌کننده‌های مذکور به ترتیب به شکل $G_{c-PID-ZNM} = 59.3 + \frac{96.7}{s} + 22.5s$ و $G_{c-PID-BGA} = 62.05 + \frac{83.14}{s} + 27.6s$ است. در شکل‌های (۱۵-الف) و (۱۵-ب) مشاهده می‌شود که علی‌رغم تغییر نقطه کاری سیستم، سیستم به عملکرد پایدار خود ادامه داده است. در شکل (۱۵-ج) مشاهده می‌شود که مودهای کششی توربین تحت تأثیر اغتشاشات وارد شده به سیستم تحریک شده و باعث نوسانات زاویه جابجایی در توربین بادی شده‌اند. البته کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، گشتاور میرایی مناسب را برای شبکه فراهم کرده‌اند و این نوسانات در زمان نشست مناسبی از سیستم حذف شده‌اند. بازیابی ولتاژ در شکل (۱۵-ه) توسط کنترل‌کننده‌های پیشنهادی به خوبی انجام شده است و شاهد بهبود پروفیل ولتاژ در ترمینال نیروگاه‌ها هستیم. نتایج حاصل از پاسخ‌های شبیه‌سازی شده سیستم در شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ منطبق بر نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل دینامیک سیستم در بخش (۳) این مقاله است. یکی از مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل پاسخ‌ها و مدل دینامیکی این است که بسته به شرایط کاری توربین بادی، میزان مشارکت توربین در فراهم‌سازی گشتاور میراکننده متغیر خواهد بود. اگر نوسانات مودهای کششی افزایش پیدا کند در این صورت نه تنها بازدهی تبدیل انرژی در توربین بادی کاهش پیدا خواهد کرد بلکه فشارها و تنش‌های مکانیکی بیشتری نیز به روتور توربین بادی تحمیل می‌شود. مشاهده می‌شود که نوسانات مودهای کششی به خوبی با کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، میراسازی می‌شوند و شاهد بهبود پروفیل ولتاژ و حاشیه پایداری دینامیکی سیستم قدرت هستیم.

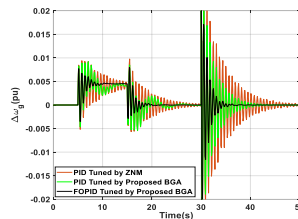
¹ Ziegler-Nichols Methods (ZNM)



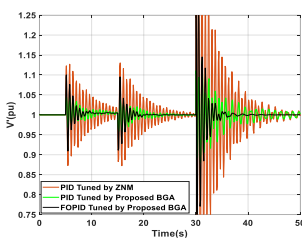
(ج) زاویه جابه جایی روتور در توربین بادی



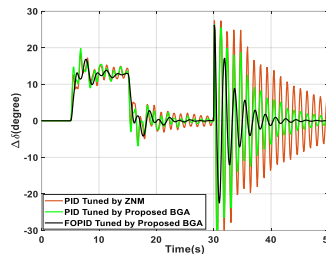
(ب) تغییرات سرعت روتور در ژنراتور سنکرون



(الف) تغییرات سرعت روتور در توربین بادی



(ه) ولتاژ ترمینال مشترک نیروگاهها



(د) تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون

شکل ۱۵. خروجی های سیستم تحت مطالعه به ازای تغییر سرعت در توربین بادی و خطای اتصال کوتاه در باس بی نهایت

نتیجه گیری

در این مقاله مدلسازی دینامیکی سیستم قدرت شامل توربین های بادی و سیستم های انتقال VSC HVDC با هدف تجزیه و تحلیل رفتار مدهای کششی توربین های بادی در شرایط کاری مختلف توربین و سیستم قدرت انجام شد. نشان داده شد که در نقاط کاری مختلف از منحنی سرعت- توان توربین بادی، مقدار گشتاور میراساز فراهم شده در نیروگاه بادی برای مقابله با نوسانات مدهای کششی متفاوت خواهد بود. این نوسانات نه تنها باعث ایجاد تنش های مکانیکی و کاهش بازدهی تبدیل انرژی در توربین بادی می شوند بلکه می توانند به کل سیستم نیز توسعه یابند و پایداری فرکانس- ولتاژ سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار دهند. برای حل معضل مذکور و با هدف بهبود پایداری سیستم قدرت، استفاده از کنترل کننده های تکمیلی پایدارساز در سیستم VSC HVDC و همچنین حلقه کنترل توان اکتیو در توربین بادی پیشنهاد گردید. نشان داده شد که با به کارگیری کنترل کننده پایدارساز توربین بادی در حلقه کنترل توان اکتیو می توان گشتاور میرایی لازم برای توربین بادی را فراهم کرد. علاوه بر این افزودن حلقه های کنترلی پایدارساز به سیستم VSC HVDC علاوه بر بهبود حاشیه پایداری سیستم قدرت، تثبیت ولتاژ در ترمینال نیروگاهها را نتیجه می دهد. در طراحی کنترل کننده ها از کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده شد که ضرایب آن از طریق الگوریتم پیشنهادی ژنتیک- خفاش محاسبه شدند.

در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، مسئله اصلی الگوریتم خفاش (همگرایی زودرس و در نتیجه گرفتار شدن در دام بهینه محلی به علت ناتوانی در ایجاد تعادل بین نرخ اکتشاف و بهره برداری) با استفاده از عملگر جهش دینامیکی (مبتنی بر احتمال) و عملگر ترکیب الگوریتم ژنتیک اصلاح گردید. در تابع هدف این الگوریتم خطای تغییرات ولتاژ، تغییرات

سرعت روتور در ماشین‌ها و تغییرات زاویه جابه‌جایی در توربین بادی در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده‌ها، تابع هدف تعریف شده در کمتر از ۸۰ تکرار به اکسترمم‌های مطلق همگرا می‌شود. بر همین اساس، راهکار پیشنهادی برای تصحیح الگوریتم خفاش نه تنها افزایش سرعت و دقت همگرایی به پاسخ‌های بهینه را نتیجه می‌دهد بلکه مانع از گرفتار شدن خفاش‌ها در اکسترمم‌های محلی خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه به همراه استراتژی کنترلی پیشنهادی که در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است، مؤثر بودن روش کنترلی برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت و همچنین افزایش بازدهی تبدیل انرژی در توربین بادی را نشان می‌دهند.

پیوست

کلید ضرایب برحسب پروینیت داده شده‌اند.

$$\begin{aligned} &Vdcr=2; Vb=1; Xd=0.3; Ws=1; S=0.1; R=0.01; f=50; D=0.1; Wb=2*\pi*f; Xw=0.2; Tpo=0.7; Xl=0.7; Xt=0.05; Xq=1.7; X'd=1.6; X'w= \\ &0.6; Hl=0.3; Hg=0.6; K=0.55; C=2; L=0.1; M=0.8; Tdo=0.4; KA=20; TA=0.05; A=(1/Xl)+(1/Xt)-B; C1=1-A*X'd; C2=G*Xq; \\ &C3=1-A*Xq; C4=G*X'd; C5=(X'w/Xw)+C1; C6=C3+(Xq/X'w); C7=-A+(1/X'w); C8=C5*C6-C2*C4; C12=C4/C8; \\ &C11=C5/C8; C10=C2/C8; C9=C6/C8; C13=0.5*Vdcr*\sin(PHr); C14=0.5*Vdcr*Mr*\cos(PHr); C15=0.5*Vdcr*\cos(PHr); \\ &C16=0.5*Vdcr*Mi*\sin(PHi); C17=Vb*\cos(Delta); C18=Vb*\sin(Delta); C19=C9*C7+(C10*G); C20=(-C9*C13/Xt)+(C10*C15/Xt); \\ &C21=(-C9*C14/Xt)+(C10*C16/Xt); C22=(-C9*C18/Xt)+(C10*C17/Xt); C23=C9/X'd; C24=C10/X'w; C30=C11*G+C12*C7; \\ &C25=(C11*C15/Xt)-(C12*C13/Xt); C26=(C11*C16/Xt)-(C12*C14/Xt); C27=(C11*C17/Xt)-(C12*C18/Xt); C28=C11/X'w; C29= \\ &C12/X'w; C31=0.5*(Vdcr*\sin(PHr)/Xt); C32=0.5*Mr*\sin(PHr)/Xt; C33=0.5*(Mr*Vdcr*\cos(PHr)/Xt); B=X'd/Xt; \\ &C34=(1/Xt)+(B*C19); C35=B*C20+C31; C36=B*C21+C33; C37=0.5*Mr*Vdcr*\sin(PHr)/Xt; C38=0.5*Mr*\cos(PHr)/Xt; \\ &C39=0.5*Vdcr*\cos(PHr)/Xt; C40=-Xq/Xt; C41=C37+C40*C26; C42=C39+C40*C25; C43=C40*C30; C44=C40*C27; \\ &C45=C40*C28; C46=C40*C29; C47=0.5*Mr*\cos(PHr); C48=0.5*Mr*Ird*\sin(PHr); C49=0.5*\cos(PHr)*Ird; 50=0.5*Mr*\sin(PHr); \\ &C51=0.5*\sin(PHr)*Irq; C52=0.5*Mr*\cos(PHr)*Irq; C53=C46*C34+C50*C43; C54=C47*C35+C49+C50*C42+C51; \\ &C55=C47*C36+C52+C48+C50*C41; C56=C47*C22+C50*C44; C57=C47*C32+C50*C38; C58=C47*C23+C50*C46; \\ &C59=C24*C47+C50*C45; C60=0.5*Mi*Vdcr*\cos(PHi)/Xt; C61=0.5*Vdcr*\sin(PHi)/Xt; C62=0.5*Mi*\sin(PHi)/Xt; \\ &C63=Vb*\sin(Delta)/Xt; C64=Vb*\cos(Delta)/Xt; C65=0.5*Vdcr*\cos(PHi)/Xt; C66=0.5*Mi*\cos(PHi)/Xt; \\ &C67=0.5*Mi*Vdcr*\sin(PHi)/Xt; C68=(0.5*Mi*Ild*\sin(PHi)+(0.5*Mi*Iiq*\cos(PHi)); C69= \\ &((0.5*\cos(PHi)*Ild)+(0.5*\sin(PHi)*Iiq)); C70=0.5*Mi*\cos(PHi); C71=-0.5*Mi*\sin(PHi); C72=C70*C60+C71*C67+C68; \\ &C73=C70*C61+C71*C65+C69; C74=C70*C62+C71*C66; C75=C71*C64+C70*C63; C76=Xq*I'd+Vpq; C77=Vpd-X'd*Iq; \\ &C78=C76*C30+Iq+C77*C19; C79=C76*C25+C77*C20; C80=C76*C26+C77*C22; C81=C76*C27+C77*C20; \\ &C82=C76*C28+C77*C24; C83=C76*C29+C77*C23; C84=Vpd*Xq/Vp; C85=Vpq/Vp; C86=X'd*Vpq/Vp; \\ &C87=C84*C30+C85+C86*C19; C88=C84*C25+C86*C20; C89=C84*C26+C86*C21; C90=C84*C27+C86*C22; \\ &C91=C84*C28+C86*C24; C92=C84*C29+C86*C23; C87=(X'd-X't); C94=C87*C19-1; J3=Xq/X'w; \\ &C88=Iwd+(X'd*C24*Ewd/Xw)+(Ewq*Xq*C28/X'w)-Ewq/X'w; \\ &C89=Iwq+(Xq*C29*Ewq/X'w)+(Ewd*X'd*C23/Xw)+(Ewd/X'w); C90=(Xq*C30*Ewq/Xw)+(Ewd*X'd*C19/Xw)-Ewd/X'w; \\ &C91=(X'd*C20*Ewd/Xw)+(Ewq*Xq*C25/X'w); C92=(X'd*C22*Ewd/Xw)+(Ewq*Xq*C27/X'w); \\ &C93=(X'd*C21*Ewd/Xw)+(Ewq*Xq*C26/X'w); J1=Xw+X'w; J2=Xw-X'w; C94=((1+J1*J3*C28)/To)-(J1/(To*X'w)); \\ &C95=(J1*J3*C30)/To; C96=(J1*J3*C25)/To; C97=(J1*J3*C26)/To; C98=(J1*J3*C27)/To; C99=Ws*Ewq; C100=S*Ws; \\ &J4=J2*To; J3=X'd/Xw; C101=-((1/To)+(J4/Xw)+(J3*J4*C23)); C102=-((J4/Xw)+(J3*J4*C19)); C103=J2*J3*C20; C104=J3*J4*C21; \\ &C105=J3*J4*C22; C106=J3*J4*C24*(S*Ws); C107=-Ws*Ewd; A'=D((1/2Ht)+(1/2Hg)); B'=D((1/2Ht)+(1/2Hg)); \\ &Alpha=(C89*C104/(2*Hg*T'do))+((C90*C21/(2*Hg*T'do)))+(C88*C97/(2*Hg*T'do)); Alpha=C91/(2*Hg); \\ &Beta=(C20*C90/(2*Hg*T'do))+((C96*C88/(2*Hg*T'do)))+(C89*C104/(2*Hg*T'do)); Beta=C93/(2*Hg); \end{aligned}$$

مشخصات الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش

سایز جمعیت اولیه: ۲۵ بازه تغییر فرکانس: [۰-۲]

تعداد نسل: در محدوده [۰-۱۰۰] درصد جهش: ۰.۱

نرخ پالس: در محدوده [۰.۱۰۰-۱.۰۰]

References

- [1] Banaei, M. R., & Taheri, N. (2011). An adaptive neural damping controller for HVDC transmission systems. *European Transactions on Electrical Power*, 21(1), 910-923. <https://doi.org/10.1002/etep.485>
- [2] Shafaghatian, N., Kiani, A., Taheri, N., Rahimkhani, Z., & Masoumi, S. S. (2020). Damping controller design based on FO-PID-EMA in VSC HVDC system to improve stability of hybrid power system. *Journal of Central South University*, 27(2), 403-417. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4305-2>
- [3] Taheri, N., Orojlo, H., & Ebrahimi, F. (2022). Damping Controller Design in Offshore Wind Power Plants to Improve Power System Stability Using Fractional Order PID Controllers Based on Optimized Exchange Market Algorithm. *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, 13(51), 91-110. http://jipet.iaun.ac.ir/article_683701_573824118ff829d8b53ff151d5e64494.pdf
- [4] Evangelista, C. A., Pisano, A., Puleston, P., & Usai, E. (2017). Receding Horizon Adaptive Second-Order Sliding Mode Control for Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Turbine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(1), 73-84. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2540539>
- [5] Ion, C. P., & Serban, I. (2018). Self-excited induction generator based microgrid with supercapacitor energy storage to support the start-up of dynamic loads. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 18(2), 51-60. <https://doi.org/10.4316/AECE.2018.02007>
- [6] Toulabi, M., Bahrami, S., & Ranjbar, A. M. (2017). An Input-to-State Stability Approach to Inertial Frequency Response Analysis of Doubly-Fed Induction Generator-Based Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(4), 1418-1431. <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2696510>
- [7] Zhang, Y., Hu, J., & Zhu, J. (2014). Three-Vectors-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(7), 3485-3500. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2282405>
- [8] Justo, J. J., Mwasilu, F., & Jung, J-W. (2015). Doubly-fed induction generator based wind turbines: A comprehensive review of fault ride-through strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45(6), 447-467. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.064>
- [9] Moharana, A., Varma, R. K., & Seethapathy, R. (2014). SSR Alleviation by STATCOM in Induction-Generator-Based Wind Farm Connected to Series Compensated Line. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(3), 947-957. <https://doi.org/10.1109/STE.2014.2311072>
- [10] Nikkhah, S., & Rabiee, A. (2018). Optimal wind power generation investment, considering voltage stability of power systems. *Renewable Energy*, 115, 308-325. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.056>
- [11] Zeng, X., Liu, T., Wang, S., Dong, Y., Li, B., & Chen, Z. (2020). Coordinated control of MMC-HVDC system with offshore wind farm for providing emulated inertia support. *The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 14(5), 673-683. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0505>
- [12] Yang, B., Yu, T., Zhang, X., Huang, L., Shu, H., & Jiang, L. (2018). Interactive teaching-learning optimiser for parameter tuning of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration. *The Institution of Engineering and Technology Generation, Transmission & Distribution*, 12(3), 678-687. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1768>

- [13] Kou, P., Liang, D., Wu, Z., Ze, Q., & Gao, L. (2018). Frequency Support From a DC-Grid Offshore Wind Farm Connected Through an HVDC Link: A Communication-Free Approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1297-1310. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2814604>
- [14] Lee, G. S., Kwon, D. H., & Moon, S. I. (2021). DC Current and Voltage Droop Control Method of Hybrid HVDC Systems for an Offshore Wind Farm Connection to Enhance AC Voltage Stability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 468-479. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3005777>
- [15] Bidadfar, A., Saborío-Romano, O., Cutululis, N. A., & Sørensen, P. E. (2021). Control of Offshore Wind Turbines Connected to Diode-Rectifier-Based HVdc Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 514-523. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.3008606>
- [16] Bahirat, H. J., & Mork, B. A. (2019). Operation of DC Series-Parallel Connected Offshore Wind Farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(2), 596-603. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2839712>
- [17] Rong, F., Wu, G., Li, X., Huang, S., & Zhou, B. (2019). ALL-DC Offshore Wind Farm With Series-Connected Wind Turbines to Overcome Unequal Wind Speeds. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1370-1381. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2834965>
- [18] Kotb, O., Ghandhari, M., Eriksson, R., Leelaruzzi, R., & Sood, V. K. (2017). Stability enhancement of an interconnected AC/DC power system through VSC-MTDC operating point adjustment. *Electric Power Systems Research*, 151, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.026>
- [19] Radhakrishnan, A., & Jeyakumar, G. (2021). Evolutionary Algorithm for Solving Combinatorial Optimization—A Review. In *Innovations in Computer Science and Engineering*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4543-0_57
- [20] Zolpakar, N. A., Yasak, M. F., & Pathak, S. (2021). A review: use of evolutionary algorithm for optimisation of machining parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(1), 31-47. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07155-7>
- [21] Yuan, X., Yuan, X., & Wang, X. (2021). Path Planning for Mobile Robot Based on Improved Bat Algorithm. *Sensors*, 21(13), 1-14. <https://doi.org/10.3390/s21134389>
- [22] Tepljakov, A., Petlenkov, E., & Belikov, J. (2011). FOMCOM: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control. *International Journal of Microelectronics and computer science*, 2(2), 51-62. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-LOD7-0029-0056>
- [23] Tepljakov, A., Petlenkov, E., Belikov, J., & Petráš, I. (2019). FOMCON toolbox for modeling design and implementation of fractional-order control systems. In *handbook of fractional calculus with applications*. De Gruyter Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1515/9783110571745-010>
- [24] Tepljakov, A. (2022). *FOMCON Toolbox for MATLAB* Version (1.50.3). GitHub. <https://github.com/extall/fomcon-matlab/releases/tag/v1.50.3>