

Stability Analysis and Optimization of Wind Energy Conversion Systems in DC Networks with Emphasis on Mechanical Dynamics and System Stabilization Methods

Sara Heydari¹, AliReza Hatami²

¹ PhD Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
s.heydari@eng.basu.ac.ir

² Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
hatamisharif@basu.ac.ir

Abstract:

This extensive summary provides an integrated framework for analyzing the sustainability and optimization of the performance of wind energy conversion systems in direct current networks. In this study, it is shown that ignoring the mechanical dynamics of the wind turbine can hide the hidden resonances from the view of purely electrical analyses and lead to an increase in the ripple voltage of the DC link, especially when constant power loads with negative differential impedance are present in the network. For this purpose, the electromechanical model of the system by combining the two-mass model of turbine-shaft-generator and the DC link model and the control structure of the voltage source converter has been developed. Then, an adaptive control mechanism based on fuzzy logic is designed to inline the coefficients of the DC bus voltage loop PI controller to increase effective attenuation against wind and load changes. Also, the hybrid stability analysis approach is used by combining time domain and frequency domain analysis to identify and control critical resonance points. The simulation results are shown in resistive load, constant power, and dynamic combined load scenarios. The proposed method significantly reduces DC voltage fluctuations and mechanical fluctuations and improves the stability of the system in critical conditions.

Keywords: Fuzzy Adaptive Control, DC Grid Stability, Wind Energy Conversion System, Two-Mass Turbine Dynamics, Energy smart grids, Frequency Impedance Analysis, Mechanical Resonance, DC Microgrid.

Article Type: Research

Received: 25. 05. 2025

Revised: 06. 12. 2025

Accepted: 18. 12. 2025

Corresponding author:

Corresponding author's address:

1. Work Motivation

With the increasing use of wind energy in DC microgrids, the stability of DC bus voltage has become an important challenge [1, 2]. In DC networks, constant power loads (CPL) due to negative differential impedance can exacerbate voltage fluctuations and push the system towards instability [3]. On the other hand, wind turbine mechanical dynamics (especially the two-mass model) include low-damping torsional modes that can be converted into converter power/current fluctuations and ultimately appear as DC-link voltage ripple [4]. The motivation of this research is to provide a comprehensive framework for stability analysis and an adaptive control strategy to reduce the resistance to wind and load changes, DC voltage fluctuations, and mechanical fluctuations and improve the stability margin of the system.

2. Contributions

This research presents three main achievements over conventional fixed-gain PI control approaches and purely electrical analyses. First, an integrated electromechanical modeling is proposed for a wind energy conversion system in the DC grid in which the dynamics of a two-mass turbine (turbine–shaft–generator) are explicitly presented alongside the DC-link model, and the voltage source converter is considered, so the torsional modes and the effect of transferring mechanical oscillations to DC voltage ripple can be observed and analyzed [4]. Second, a hybrid stability analysis framework has been proposed that integrates time-domain analysis (state space and transient response) with a frequency-domain perspective (impedance/spectral response analysis) and allows for the identification of latent critical resonances [3, 5]. Third, a fuzzy-adaptive control mechanism is designed to tune the PI coefficients of the DC bus voltage-loop controller online, which adjusts the gains under load and wind changes without dependence on a fixed operating point, such that the initial voltage drop is suppressed (especially in constant power loads with negative differential impedance) and then, by increasing damping, persistent oscillations and resonance excitation are prevented [6]. This set improves stability and reduces DC voltage oscillations and mechanical oscillations compared to classical fixed-gain methods.

3. Methods

In this study, a wind energy conversion system (WECS) connected to the DC grid is modeled, which includes a wind turbine, a permanent magnet synchronous generator (PMSG), a voltage source converter (VSC), and a DC-link capacitor. The mechanical subsystem is represented by a two-mass power transmission system (turbine–shaft–generator) to record torsional states and track how mechanical oscillations are propagated to power or transducer current.

DC-bus voltage dynamics are formulated using capacitor current balance:

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} - I_{load}$$

where the controlled flow is injected by the VSC and the load flow. For constant power loads (CPL), the following relationship is used: $I_{dc} I_{load}$

$$I_{load} = \frac{P}{V_{dc}}$$

which reflects the negative incremental impedance behavior during voltage drop. The DC-link voltage adjustment loop is considered as the main stabilization mechanism, and a fuzzy-adaptive layer is added to adjust the PI gains based on the voltage error and its change rate online. This tuning strategy temporarily increases the gains in extreme transients to limit the initial voltage drop. And then adjusts the interests to improve attenuation and prevent stable volatility (1) resistive load with a stepwise decrease in resistance, (2) CPL load with a stepped increase in power as a critical state, and (3) dynamic combined load. In each scenario, the temporal response and mechanical indicators (e.g., shaft torsion oscillation) were recorded and compared with V_{dc} classical PI control. In each scenario, time domain response and mechanical indicators (such as shaft torsional oscillations) are recorded and compared with a typical fixed-gain PI controller. In addition, FFT-based frequency analysis is performed to investigate resonance behavior and quantify oscillation attenuation.

4. Results

The simulation results show that considering the mechanical dynamics of the turbine (two-mass model) causes the emergence of torsional modes and its direct effect on the DC bus voltage ripple, so that the power/current fluctuations of the converter side near normal frequencies can stimulate the DC link voltage. Frequency analysis (FFT) showed that the PI controller with constant gain in the range of natural modes undergoes response amplification, while The proposed fuzzy-adaptive method significantly reduces the amplitude of oscillation, e.g. the amplitude of oscillation in 10Hz has been reduced from 94.9V to 74.7V (an improvement of 21.3%), in 20Hz from 69.5V to 32.5V (an improvement of 53.2%), and in 30Hz from 13.1V to 2.5V (an improvement of 81.2%).

In load scenarios, the difference is small in the resistive load state (0.19V in PI vs. 0.17V in the proposed method). However, in the critical state of constant power load (CPL), the PI control reaches extreme fluctuation and boundary stability due to negative differential impedance, so that the maximum voltage fluctuation is reported to be 67.3V, while the proposed method reduces this value to 19.2V (71.4% reduction) and increases the surge from 34.9V to 5.6V. In the combined load scenario, the

amplitude of voltage fluctuations is reduced from 46.5V (PI) to 19.2V and the system is stable It remains. In addition to electrical improvement, the oscillation of the torsion angle of the shaft was also reduced from 0.0102rad in PI to 0.0078rad in the proposed method (an improvement of 23.4%), which indicates an increase in electromechanical damping and a decrease in mechanical stresses of the system.

5. Conclusion

In this study, it was shown that the stability of wind energy conversion systems in DC networks cannot be fully explained by purely electric models alone, because the dynamics of a two-mass turbine can create low damping torsional modes and transfer the voltage ripple of the DC link from the power/current path of the converter, which is intensified in the presence of a constant power load (CPL) which has a negative differential impedance. To improve stability, The proposed fuzzy-adaptive controller inhibits the initial voltage drop by inline adjustment of the PI coefficients of the DC bus voltage loop and then prevents the formation of stable fluctuations by increasing the damping. The simulation results showed that in the CPL critical scenario, the amplitude of voltage fluctuation decreased from 67.3V to 19.2V (71.4% decrease) and the amplitude increased from 34.9V to 5.6V. Also, in frequency analysis, amplitude reduction in resonance frequencies (including 81.2% at 30Hz) and the reduction of shaft torsion fluctuation from 0.0102rad to 0.0078rad (an improvement of 23.4%) indicates an increase in the damping of the total electromechanical system. This framework is suitable for the sustainable design and operation of WECS in DC microgrids and has the potential to be extended to multi-source structures.

تحلیل پایداری و بهینه‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی باد در شبکه‌های DC با تأکید بر تعامل دینامیک‌های مکانیکی و روش‌های تثبیت سیستم

سارا حیدری^۱، علیرضا حاتمی^۲

۱- دانشجوی دکتری- گروه برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

s.heydari@eng.basu.ac.ir

۲- دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: در این تحقیق، یک چارچوب نوین برای تحلیل پایداری و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تبدیل انرژی باد در شبکه‌های جریان مستقیم (DC) ارائه شده است. با بهره‌گیری از مدل‌سازی دقیق دینامیک‌های مکانیکی توربین بادی و تلفیق آن با تحلیل امیدانسی در حوزه فرکانس، رفتار سیستم در شرایط مختلف بار و اغتشاشات بررسی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک کنترل‌کننده تطبیقی مبتنی بر منطق فازی است که قادر است به‌صورت بلادرنگ پارامترهای کنترلی را با توجه به تغییرات بار و باد تنظیم کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی منجر به کاهش میانگین بیش از ۷۰٪ در نوسانات مکانیکی و ولتاژ DC نسبت به روش‌های سنتی شده است. همچنین تحلیل فرکانسی سیستم نشان داد که کنترل پیشنهادی به‌طور کامل پیک‌های رزونانس بحرانی را حذف کرده و عملکرد پایداری در مواجهه با بارهای پویا فراهم می‌آورد. این روش می‌تواند در طراحی نسل جدیدی از سیستم‌های هوشمند انرژی در شبکه‌های DC، به‌ویژه در میکروگریدهای تجدیدپذیر، کاربرد مؤثری داشته باشد.

کلمات کلیدی: کنترل تطبیقی فازی، پایداری شبکه DC، انرژی باد، دینامیک توربین دو جرمی، امیدانسی فرکانسی، رزونانس مکانیکی، شبکه‌های هوشمند انرژی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - چهارباغ شهید احمدی روشن - کدپستی ۳۸۶۹۵ - ۶۵۱۷۸ - دانشگاه بوعلی سینا همدان -

دانشکده‌ی مهندسی-گروه برق

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل افزایش نگرانی‌ها پیرامون تغییرات اقلیمی، کاهش منابع فسیلی و نیاز به کاهش آلاینده‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱]. یکی از مؤثرترین منابع تجدیدپذیر، انرژی باد است که با استفاده از سیستم‌های تبدیل انرژی باد ($WECS^1$)، امکان بهره‌برداری از آن به صورت کارآمد فراهم می‌شود [۲]. این سیستم‌ها به دلیل قابلیت تطبیق با شبکه‌های برق جریان مستقیم (DC)، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای مدرن مانند شبکه‌های هوشمند و میکروگریدها محسوب می‌شوند. علاوه بر این، فناوری‌های مرتبط با انرژی باد به دلیل پیشرفت‌های اخیر در زمینه طراحی توربین‌های بادی و سیستم‌های کنترل، به یکی از ارکان اصلی استراتژی‌های انرژی پاک تبدیل شده‌اند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های تبدیل انرژی باد، تعامل‌های دینامیکی بین این سیستم‌ها و شبکه‌های DC چالش‌هایی را در زمینه‌ی پایداری ایجاد کرده است. به ویژه، دینامیک‌های مکانیکی توربین‌های بادی و تأثیر آنها بر روی نوسانات ولتاژ و توان در شبکه، نیازمند تحلیل دقیق و ارائه راهکارهای تثبیت‌کننده است [۳]. این چالش‌ها با افزایش نفوذ انرژی باد در شبکه‌های DC تشدید می‌شوند، چرا که سیستم‌های جریان مستقیم به تغییرات کوچک در شرایط عملکردی بسیار حساس هستند. بسیاری از مطالعات پیشین بر روی مدل‌های ساده‌سازی شده تمرکز داشته‌اند که اغلب از تأثیرات کلیدی مانند نوسانات مکانیکی توربین‌های بادی و خصوصیات بارهای متغیر در شبکه‌های DC غفلت کرده‌اند [۴]. این مسئله نیاز به توسعه مدل‌سازی دقیق‌تر و راهکارهای کنترلی جدید را برجسته می‌کند.

این پژوهش با هدف تحلیل جامع پایداری و بهینه‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی باد در شبکه‌های DC انجام شده است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از مدل‌سازی پیشرفته و شبیه‌سازی‌های زمان‌بندی شده، تعامل‌های دینامیکی منابع انرژی باد با شبکه‌های DC بررسی شده و راهکارهای نوینی برای تثبیت و بهبود پایداری ارائه می‌شود. این راهکارها شامل روش‌های کنترل فعال برای کاهش نوسانات مکانیکی و بهره‌گیری از تکنیک‌های جدید تثبیت توان می‌باشد که در مقایسه با رویکردهای موجود از دقت و کارآمدی بالاتری برخوردارند. به طور خاص، این تحقیق تلاش می‌کند، تأثیر ترکیب بارهای پویا و ثابت را در پایداری سیستم‌های DC مدل‌سازی کرده و نشان دهد چگونه استراتژی‌های کنترلی نوین می‌توانند عملکرد سیستم را بهبود بخشند.

نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی باد و افزایش اعتماد به نفس در استفاده از این منابع در کاربردهای مختلف کمک کند. همچنین، این پژوهش با ارائه یک چارچوب نوآورانه برای تحلیل و مدیریت پایداری، نقش مهمی در توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر ایفا می‌کند. این چارچوب می‌تواند به عنوان

پایه‌ای برای مطالعات آتی در زمینه شبکه‌های هوشمند و میکروگریدها مورد استفاده قرار گیرد.

۲- پیشینه تحقیق

پیشرفت‌های اخیر در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های تبدیل انرژی باد ($WECS$)، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها را به سمت بهبود بهره‌وری و پایداری این سیستم‌ها سوق داده است [۵]. مطالعات جدیدتر از جمله تحقیق منتشرشده در سال ۲۰۲۴ درباره پایداری میکروگریدهای DC نشان می‌دهد که افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر باعث حساسیت بیشتر شبکه نسبت به نوسانات توان و رفتار دینامیکی بار می‌شود. این پژوهش‌ها تأکید می‌کنند که روابط منبع-بار و ساختار کنترلی مبدا نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ پایداری ولتاژ و کیفیت توان دارند و نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر دینامیک‌های مکانیکی و الکتریکی را برجسته می‌سازند [۶].

در حوزه شبکه‌های DC، چالش‌های پایداری ناشی از نوسانات مکانیکی و بارهای متغیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۷]. مطالعات انجام شده در این حوزه به بررسی ابعاد مختلف عملکرد سیستم‌های $WECS$ و تأثیر تعاملات دینامیکی آنها با شبکه‌های DC پرداخته‌اند. به عنوان مثال، برخی تحقیقات بر نقش نوسانات مکانیکی توربین‌ها در ایجاد ناپایداری تأکید داشته و راهکارهایی برای کاهش این نوسانات ارائه کرده‌اند [۸].

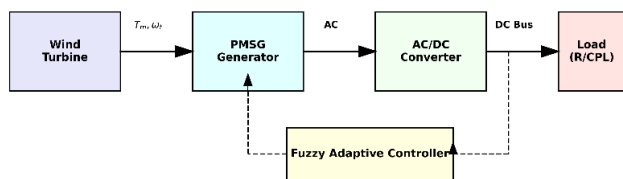
در همین راستا، $Elkodama$ و همکاران در یک مرور جامع بر روش‌های کنترلی توربین‌های بادی محور افقی ($HAWT^2$)، طیف گسترده‌ای از راهبردهای کنترلی کلاسیک، پیشرفته و مبتنی بر هوش مصنوعی را برای بهبود کارایی و کاهش نوسانات آیرودینامیکی بررسی کرده‌اند، با این حال تمرکز آنها عمدتاً بر سطح کنترل توربین و ژنراتور بوده و پایداری لینک‌های DC و اثر بارهای توان ثابت در ساختار میکروگریدهای DC به‌طور مستقیم مورد مطالعه قرار نگرفته است [۹]. در یک مطالعه واقعی گزارش‌شده در سال ۲۰۲۴ درباره سیستم‌های بادی متصل به شبکه $HVDC^3$ ، از روش مدل‌سازی امپدانس برای تحلیل پایداری استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تعامل میان دینامیک‌های مکانیکی توربین و امپدانس معادل شبکه می‌تواند منجر به ایجاد پیک‌های رزونانسی گردد، که در تحلیل‌های الکتریکی ساده‌شده قابل مشاهده نیستند. بنابراین تحلیل امپدانس یکی از ابزارهای مؤثر برای شناسایی نقاط بحرانی و طراحی راهکارهای تثبیت‌کننده محسوب می‌شود [۱۰].

مطالعات گذشته عمدتاً بر روی مدل‌های ساده‌شده تمرکز داشته‌اند. با وجود مطالعات جدید، اکثر پژوهش‌ها همچنان به تحلیل رفتار الکتریکی مبداها محدود هستند و تعاملات عمیق میان دینامیک‌های مکانیکی توربین دو جرمی و رفتار امپدانس شبکه DC کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در اغلب تحقیقات، رفتار بارهای توان ثابت (CPL) که دارای امپدانس تفاضلی منفی بوده و یکی از بحرانی‌ترین عوامل

۲. تحلیل پایداری مبتنی بر امپدانس و فضای حالت (Hybrid State-Impedance Stability Analysis).

۳. طراحی یک کنترل کننده هوشمند تطبیقی مبتنی بر منطق فازی برای تنظیم عملکرد سیستم در شرایط متغیر باد و بار. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ساختار کلی سیستم شامل توربین دو جرمی، مبدل منبع ولتاژ (VSC)، لینک DC و کنترل کننده تطبیقی فازی می باشد. این دیاگرام بلوکی نمای کلی تعامل میان بخش های مکانیکی و الکتریکی سیستم را ارائه می دهد.

Proposed Wind Energy Conversion System Block Diagram



شکل (۱): دیاگرام بلوکی پیشنهادی سیستم تبدیل انرژی باد متصل به شبکه

۳-۱- مدل سازی سیستم

در این بخش، دینامیک مکانیکی توربین بادی به صورت «مدل دو جرمی» (توربین-شف-ژنراتور) ارائه می شود. هدف از این مدل سازی، نمایش دقیق مودهای طبیعی پیچشی شفت و نحوه انتقال نوسانات مکانیکی به گشتاور ژنراتور و در نهایت اثر آن بر پایداری لینک DC است. معادلات حاکم مطابق [۳] به صورت زیر بیان می شوند:

$$T_{tw} - K_s(\theta_t - \theta_g) - D_{tw} = \frac{d\omega_t}{dt} J_t \quad (1)$$

$$K_{gs}(\theta_t - \theta_g) - T_e - D_{gw} = \frac{d\omega_g}{dt} J_g \quad (2)$$

در معادلات فوق، J_t و J_g به ترتیب نشان دهنده ممان اینرسی توربین و روتور ژنراتور بر حسب $kg \cdot m^2$ می باشند. متغیرهای ω_t و ω_g بیانگر سرعت زاویه ای توربین و ژنراتور بر حسب rad/s هستند. گشتاور آیرودینامیکی ورودی ناشی از وزش باد با نماد T_{tw} و گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط ژنراتور با T_e نمایش داده شده است که هر دو بر حسب $N \cdot m$ اندازه گیری می شوند. همچنین K_{gs} و K_s ضرایب سختی شفت $(N \cdot m/rad)$ و D_{tw} و D_{gw} ضرایب میرایی ویسکوز در سمت توربین و ژنراتور $(N \cdot m \cdot s/rad)$ هستند. اختلاف

ناپایداری در شبکه های DC محسوب می شوند، به صورت جامع مدل سازی نشده است. برای مثال، Chen و همکاران (۲۰۲۱) تأثیرات بارهای ثابت و متغیر را بر پایداری سیستم های DC بررسی کرده اند، اما تأثیرات نوسانات مکانیکی توربین های بادی را به طور کامل مدل نکرده اند [۴]. این مسئله باعث شده است که برخی از مشکلات پیچیده تر پایداری همچنان بدون پاسخ باقی بماند.

از منظر تاب آوری سایبر-فیزیکی نیز، Zhang و همکاران با ارائه یک مرور جامع از رویکردهای مدل سازی و راهبردهای کنترل بهینه در سیستم های قدرت نشان داده اند، که به کارگیری ساختارهای کنترلی پیشرفته و چندلایه می تواند حاشیه پایداری و مقاومت سیستم را در برابر اغتشاشات افزایش دهد [۱۱]. با این حال، تمرکز این دسته از مطالعات عمدتاً بر ساختارهای AC یا مدل های کلان شبکه بوده و پایداری لینک های DC در حضور دینامیک های مکانیکی توربین های بادی و بارهای CPL به صورت ترکیبی و جزئی نگر مورد بررسی قرار نگرفته است. پژوهش حاضر، شکاف موجود در مطالعات پیشین را با تمرکز بر تحلیل جامع دینامیک های مکانیکی توربین های بادی و ارائه راهکارهای تثبیت کننده نوآورانه پوشش می دهد. از جمله نوآوری های این پژوهش می توان به مدل سازی دقیق سیستم های DC با در نظر گرفتن تمام دینامیک های مکانیکی و تأثیرات متقابل بارهای پیچیده اشاره کرد. علاوه بر این، بهره گیری از روش های جدید شبیه سازی و ارائه شاخص های بهبود پایداری، تحقیق حاضر را از مطالعات پیشین متمایز می سازد. برای نمونه، در این پژوهش تأثیر استفاده از کنترل کننده های چندلایه برای بهبود تعامل دینامیکی بین منابع باد و شبکه DC به طور کامل بررسی می شود.

با توجه به شکاف های موجود در ادبیات، نیاز به یک چارچوب جامع که بتواند دینامیک های الکترومکانیکی، رفتار امپدانس شبکه و اثرات بارهای CPL را هم زمان تحلیل کند، به وضوح احساس می شود. پژوهش حاضر در راستای رفع همین خلأ علمی، رویکردی ترکیبی برای مدل سازی، تحلیل و طراحی کنترل کننده ارائه می دهد.

این تحقیق همچنین به تحلیل حساسیت سیستم نسبت به تغییرات مختلف در شرایط عملیاتی مانند افزایش یا کاهش بارهای شبکه پرداخته و نشان می دهد که چگونه روش های کنترلی پیشنهادی می توانند عملکرد سیستم را در مواجهه با شرایط غیرخطی بهبود دهند. نتایج این بخش از پژوهش می تواند به عنوان مرجع عملی برای طراحان سیستم های انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد.

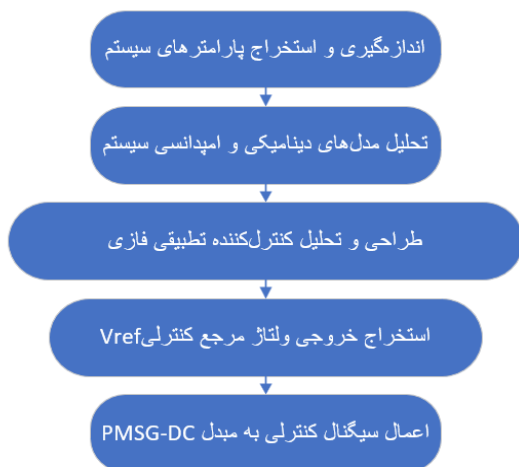
۳- روش شناسی

در این تحقیق، برای اولین بار یک چارچوب هیبریدی مدل سازی-کنترل معرفی شده است که شامل سه لایه اصلی می باشد:

۱. مدل سازی دو گانه مکانیکی-الکتریکی سیستم تبدیل انرژی باد بر پایه ژنراتور مغناطیس دائم ($PMSG^4$).

آن طراحی شده و به گونه‌ای تنظیم شده است که در شرایط گذرای شدید ناشی از بار توان ثابت (CPL^8) که دارای امپدانس تفاضلی منفی است — بهره‌های کنترلی را برای جلوگیری از افت سریع ولتاژ به‌طور موقت افزایش دهد. پس از عبور از اغتشاش نیز، جهت جلوگیری از ایجاد نوسانات اضافی و حفظ پایداری، بهره‌ها به‌صورت خودکار تعدیل می‌شوند.

آنچه این ساختار را متمایز می‌سازد، به‌کارگیری مستقیم کنترل فازی در حلقه تنظیم ولتاژ لینک DC و تعامل آن با دینامیک‌های غیرخطی توربین دو جرمی و بارهای پویا است؛ موضوعی که موجب افزایش میرایی مؤثر نوسانات الکترومکانیکی و بهبود چشمگیر پایداری سیستم در برابر شرایط گذرای شدید می‌شود. این رویکرد ترکیبی مکانیکی-الکتریکی، ماهیت اصلی نوآوری پیشنهادی را تشکیل می‌دهد.



شکل (۳): فلوچارت عملکرد الگوریتم کنترلی فازی-تطبیقی

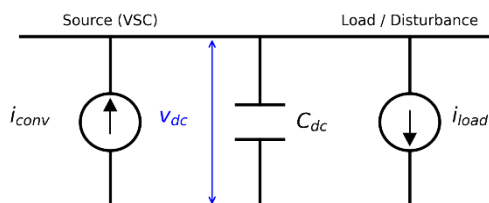
۳-۴- تحلیل پایداری ترکیبی (نوآوری دوم)

دومین نوآوری این پژوهش، توسعه یک چارچوب تحلیل پایداری هیبریدی (Hybrid Stability Analysis) است که شکاف بین تحلیل‌های فضای حالت در حوزه زمان و تحلیل امپدانس در حوزه فرکانس را پر می‌کند. در روش پیشنهادی، ابتدا مدل غیرخطی دو جرمی توربین به‌صورت کامل در فضای حالت استخراج شده و سپس با معادل‌سازی آن به یک امپدانس معادل مکانیکی-الکتریکی، در حلقه امپدانس منبع-بار قرار می‌گیرد. به این ترتیب، نقاط رزونانس پنهان سیستم که در مدل‌های متداول صرفاً الکتریکی نادیده گرفته می‌شوند، شناسایی شده و راهکارهای تثبیت بر اساس آن ارائه می‌شود. بر خلاف مراجع [۲] و [۵] که تحلیل پایداری را تنها در یکی از دو حوزه زمان یا فرکانس انجام داده‌اند، در این مقاله هر دو نوع تحلیل به‌صورت هم‌زمان و بر روی یک مدل یکپارچه مکانیکی-الکتریکی اعمال شده است؛ این تلفیق روشمند، هسته نوآوری دوم پژوهش را تشکیل می‌دهد.

موقعیت زاویه‌ای بین دو جرم با عبارت $(\theta_t - \theta_g)$ تعریف می‌شود که نشان‌دهنده زاویه پیچش شفت (که در برخی متون با δ نمایش داده می‌شود) بر حسب rad است و جفت‌شدگی دینامیکی بین بخش مکانیکی و الکتریکی را مدل می‌کند.

۳-۲- مدل الکتریکی در شبکه DC

مدل‌سازی مبدل منبع ولتاژ (VSC^5) به صورت کنترل‌کننده جریان مبتنی بر مرجع dq^6 انجام شده است و با در نظر گرفتن امپدانس بار، ولتاژ لینک DC به‌صورت دینامیکی تنظیم می‌شود [۱۲]. ساختار دینامیکی لینک DC و نحوه‌ی تبادل توان میان مبدل و بار در مدار معادل شکل (۲) قابل مشاهده است. این مدار پایه استخراج معادله (۳) بر اساس قانون جریان کیرشهف (KCL) را تشکیل می‌دهد.



شکل (۲): مدار معادل دینامیکی لینک DC شامل خازن واسط و جریان‌های ورودی/خروجی

$$I_{load} + \frac{dV_{dc}}{dT} C_{dc} = I_{dc} \quad (3)$$

معادله (۳) بر اساس قانون جریان کیرشهف (KCL^7) در مدار معادل شکل (۲) استخراج شده است. در این رابطه، C_{dc} ظرفیت خازن لینک DC بر حسب فاراد (F)، V_{dc} ولتاژ لحظه‌ای باس DC بر حسب ولت (V) و dV_{dc}/dT نشان‌دهنده نرخ تغییرات زمانی ولتاژ باس می‌باشد. همچنین، I_{dc} جریان تزریقی کنترل‌شده از سمت مبدل منبع ولتاژ ($Voltage Source Converter - VSC$) و I_{load} جریان مصرفی متناظر با مجموع بارهای متصل به لینک DC (اعم از مقاومتی، توان ثابت و ترکیبی) بر حسب آمپر (A) در نظر گرفته شده‌اند. این معادله تبیین می‌کند که دینامیک ولتاژ باس مستقیماً تابع تفاضل جریان تولیدی مبدل و جریان مصرفی بار است و هرگونه ناترازی در این جریان‌ها منجر به تغییر سطح ولتاژ لینک می‌گردد.

۳-۳- طراحی کنترل هوشمند تطبیقی (نوآوری)

نوآوری اصلی ارائه‌شده در این بخش، طراحی و پیاده‌سازی یک مکانیزم تنظیم گر فازی نوین است که بدون نیاز به مدل‌سازی ریاضی دقیق یا خطی‌سازی سیستم حول نقطه کار، ضرایب کنترل‌کننده تناسبی و انتگرالی (K_p, K_i) را به‌صورت برخط تنظیم می‌کند. در ساختار پیشنهادی، قاعده پایه فازی بر اساس اندازه خطا و نرخ تغییرات

۴- ارزیابی جامع عملکرد

به منظور ارزیابی جامع عملکرد سیستم پیشنهادی و سنجش میزان استحکام (Robustness) کنترل کننده در شرایط کاری سخت گیرانه، سه سناریوی آزمون مجزا بر اساس پارامترهای واقعی شبکه طراحی شده است. جزئیات دقیق این سناریوها و اهداف کنترلی آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. در تمامی این موارد، اغتشاش در لحظه اعمال می‌شود تا پاسخ گذرا و زمان نشست سیستم به دقت ارزیابی گردد.

جدول (۱): تعریف دقیق سناریوهای شبیه سازی و شرایط اغتشاش

شماره سناریو	نوع بار و شرایط آزمون	شرح اغتشاش اعمال شده در	هدف از آزمون
۱	بار مقاومتی خالص (Resistive Load)	کاهش پله‌ای مقاومت بار از 1440Ω به 1000Ω در $t=3s$	ارزیابی پاسخ پایه سیستم و زمان بازبازی ولتاژ در بارهای خطی
۲	بار توان ثابت (CPL)	افزایش پله‌ای توان مصرفی از 500 kw به 650 kw در $t=3s$	بررسی پایداری در حضور "امپدانس تفاضلی منفی" (شرایط بحرانی)
۳	بار ترکیبی پویا (Mixed Load)	تغییر همزمان بار اهمی و موتوری با افزایش سطح توان	شبیه سازی شرایط واقعی میکروگرید و بررسی عملکرد در نقاط کار متغیر

همچنین پارامترهای دقیق سیستم مورد مطالعه شامل مشخصات توربین بادی، ژنراتور و لینک DC که در شبیه سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول (۲) ارائه شده است.

برای انجام شبیه سازی‌ها، پارامترهای مکانیکی و الکتریکی توربین، ژنراتور و لینک DC مطابق جدول (۲) تنظیم شده‌اند. این مقادیر مبنای تحلیل های گذرا، فرکانسی و پایداری سیستم در بخش نتایج هستند.

جدول (۲): پارامترهای سیستم شبیه سازی شده

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
اینرسی توربین	(J_t)	۶۰	kg/m^2
اینرسی ژنراتور	(J_g)	۴۰	kg/m^2
سختی شفت	(K_s)	۸۰۰۰۰۰	N.m/rad
میرایی توربین	(D_t)	۲۰۰۰	N.m.s/rad
ظرفیت خازن DC	C_{dc}	۰.۰۰۸	F
ولتاژ مرجع DC	V_{ref}	۱۲۰۰	V

۴-۱- نتایج مدل سازی و تحلیل حساسیت فرکانسی

نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که افزودن دینامیک مکانیکی توربین (مدل دو جرمی) باعث ظهور مودهای پیچشی مشخصی در پاسخ

ولتاژ باس DC می‌شود. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که گشتاور منتقل شده از شفت (T_s) در فرکانس‌های طبیعی سیستم می‌تواند نوسانات سرعت ژنراتور و سپس نوسانات توان/جریان سمت مبدل را تشدید کرده و در نهایت به صورت ریپل ولتاژ روی لینک DC ظاهر شود. به همین دلیل، صرفاً تحلیل الکتریکی مبدل بدون لحاظ دینامیک مکانیکی، امکان شناسایی این نقاط بحرانی را کاهش می‌دهد.

برای کمی سازی این اثر، تحلیل طیفی مبتنی بر FFT با تزریق اغتشاشات سینوسی کوچک به مرجع ولتاژ انجام شد. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در بازه ۱۰ تا ۳۰ هرتز (که با مودهای طبیعی پیچشی سازه/شفت هم پوشانی دارد) کنترل کننده PI کلاسیک دچار افزایش چشمگیر دامنه نوسان می‌گردد. علت این موضوع آن است که تنظیم ثابت بهره های PI معمولاً برای یک نقطه کار خاص انجام می‌شود و در حضور مودهای کم میرایی مکانیکی، حلقه ولتاژ DC عملاً با یک سیستم مرتبه بالاتر و دارای رزونانس مواجه می‌شود؛ در نتیجه حاشیه فاز/بهره کاهش یافته و پیک‌های رزونانسی در پاسخ فرکانسی تقویت می‌شوند.

در مقابل، کنترل کننده فازی-تطبیقی پیشنهادی با پایش خطا و نرخ تغییرات آن، بهره های مؤثر حلقه را به صورت برخط تنظیم می‌کند. این رفتار دو اثر کلیدی دارد: (۱) در حوالی رزونانس، با افزایش میرایی مؤثر حلقه کنترل، از تقویت پیک جلوگیری می‌شود؛ (۲) در فرکانس های غیر بحرانی، از بزرگ شدن بی مورد بهره ها و تزریق نویز/نوسان اضافی جلوگیری می‌گردد. این منطبق باعث شده است دامنه نوسانات در ۲۰ هرتز و ۳۰ هرتز به ترتیب به میزان قابل توجهی کاهش یابد (مطابق جدول (۳)) و رفتار سیستم از حالت «رزونانسی» به حالت «میرا» نزدیک شود.

جدول (۳): تحلیل پاسخ فرکانسی و مقایسه دامنه نوسانات ولتاژ

(خروجی تحلیل FFT)

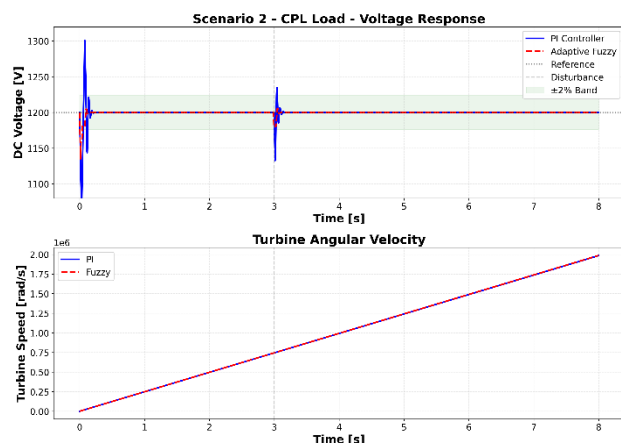
میزان بهبود (%)	دامنه نوسان با پیشنهادی (V)	دامنه نوسان با روش PI (V)	فرکانس (Hz)
۲۱.۳%	۷۴.۷	۹۴.۹	۱۰
۵۳.۲%	۳۲.۵	۶۹.۵	۲۰
۸۱.۲%	۲.۵	۱۳.۱	۳۰

۴-۲- تحلیل حساسیت و عملکرد در سناریوهای بار

مختلف

برای ارزیابی پایداری در شرایط بهره برداری واقعی، سه سناریوی بار مطابق جدول (۱) بررسی شد و نتایج کمی در جدول (۴) ارائه گردید. در سناریوی ۱ (بار مقاومتی)، هر دو کنترل کننده پاسخ قابل قبول دارند زیرا بار خطی بوده و امپدانس آن با ولتاژ افزایش می‌یابد؛ در نتیجه باس DC ذاتاً رفتار میراتری نشان می‌دهد و احتمال ناپایداری کاهش می‌یابد.

این موضوع به صورت ذاتی یک فیدبک مثبت ناخواسته ایجاد می‌کند. از دید حلقه کنترل، این رفتار باعث کاهش میرایی مؤثر و کوچک شدن حاشیه پایداری می‌شود. به همین دلیل، کنترل‌کننده PI با ضرایب ثابت که معمولاً برای شرایط بار خطی یا نقطه کار نامی تنظیم شده است، در مواجهه با CPL دچار نوسانات شدید شده و مقدار نوسان ماکزیمم به ۷۶۷.۳ و فراجاهش به ۷۳۴.۹ می‌رسد؛ بنابراین سیستم در وضعیت «پایداری مرزی» قرار می‌گیرد (شکل ۴).



شکل (۴): مقایسه پاسخ زمانی ولتاژ DC در سناریوی بار CPL (کاهش ۷۱ درصدی نوسانات)

در روش پیشنهادی، منطق فازی-تطبیقی بر اساس دو ورودی اصلی (خطای ولتاژ و نرخ تغییرات خطا) عمل می‌کند و به طور هدفمند دو فاز کنترلی را پیاده می‌سازد:

- ۱) فاز مهار افت ولتاژ: همزمان با وقوع تغییر بار، بهره‌ها به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابند تا اختلاف جریان ($i_{psc} - i_{load}$) سریع‌تر جبران و افت اولیه ولتاژ محدود شود.
- ۲) فاز افزایش میرایی: پس از عبور از لحظه بحرانی، بهره‌ها به صورت کنترل‌شده تعدیل می‌شوند تا از تحریک رزونانس‌ها و ایجاد نوسان پایدار جلوگیری گردد.

نتیجه این رفتار دو مرحله‌ای، کاهش نوسان ماکزیمم به ۷۱۹.۲ (کاهش ۷۱.۴٪) و کاهش فراجاهش به ۷۵.۶ است. بنابراین، بهبود مشاهده‌شده صرفاً کاهش عددی نیست، بلکه نشان‌دهنده «تغییر رژیم دینامیکی» سیستم از حالت نزدیک به ناپایداری به حالت میرا است.

ب) تحلیل دینامیک مکانیکی و صفحه فاز (تبیین ارتباط الکترومکانیکی):

برخلاف بسیاری از کارها که تنها ولتاژ باس DC را بررسی می‌کنند، در این پژوهش متغیرهای مکانیکی نیز پایش شده‌اند تا اثر کنترل بر تنش‌های شفت مشخص شود. کاهش نوسانات زاویه پیچش شفت (θ_s) از 0.0102 rad در روش PI به 0.0078 rad در روش پیشنهادی (بهبود

اما سناریوی ۲ (بار توان ثابت - CPL) بحرانی‌ترین حالت است. دلیل فیزیکی آن این است که در CPL، با افت ولتاژ، جریان مصرفی افزایش می‌یابد ($i_{load} = P/V_{dc}$) و این رفتار مانند «امپدانس تفاضلی منفی» عمل می‌کند؛ یعنی یک اغتشاش کوچک ولتاژ می‌تواند باعث افزایش جریان و تشدید افت ولتاژ شود. به همین علت، کنترل‌کننده PI^1 با بهره ثابت در این حالت با کاهش میرایی مؤثر مواجه شده و دامنه نوسانات ولتاژ به مقدار مرزی (۷۶۷.۳) می‌رسد.

در مقابل، روش پیشنهادی با افزایش سریع و موقت بهره‌ها هنگام وقوع اغتشاش (برای جلوگیری از افت اولیه ولتاژ) و سپس کاهش کنترل‌شده بهره‌ها (برای جلوگیری از نوسان پایدار)، حلقه ولتاژ DC را از ورود به چرخه نوسانی بازمی‌دارد و پایداری باس را حفظ می‌کند. نتیجه این مکانیزم همان کاهش محسوس نوسانات در جدول (۴) است.

در سناریوی ۳ (بار ترکیبی پویا)، سیستم همزمان با بارهای خطی و غیرخطی مواجه است؛ بنابراین رفتار گذرا پیچیده‌تر شده و امکان تحریک مودهای مکانیکی نیز وجود دارد. با این حال، روش پیشنهادی به دلیل تطبیق‌پذیری برخط، همچنان توانسته دامنه نوسانات را در سطح پایین نگه دارد و نشان دهد که در نقاط کار متغیر نیز از حاشیه پایداری مناسب برخوردار است.

جدول (۴): نتایج کمی شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف بار (ماکزیمم

نوسان و وضعیت پایداری			
وضعیت پایداری (روش پیشنهادی)	دامنه نوسانات با روش پیشنهادی	دامنه نوسانات با روش پیشنهادی	نوع بار
ولتاژ با PI			
پایدار	0.17 V	0.19 V	بار مقاومتی
کاملاً پایدار	19.2 V	67.3 V	بار توان ثابت
(CPL)			
پایدار	19.2 V	46.5 V	بار ترکیبی

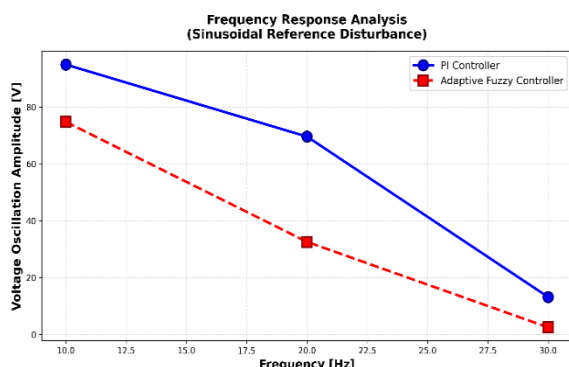
۵- نتایج تحلیل و بحث

نتایج شبیه‌سازی‌های کمی و کیفی در سه سناریوی تعریف‌شده نشان می‌دهد که عملکرد روش پیشنهادی نه تنها از نظر کاهش دامنه نوسانات بهتر است، بلکه از منظر «مکانیزم پایداری» نیز نسبت به PI کلاسیک برتری دارد. در ادامه، نتایج با تمرکز بر چرایی رخدادها و تبیین فیزیکی/کنترلی تحلیل می‌شود.

الف) تحلیل پاسخ زمانی در شرایط بحرانی (CPL):

سناریوی بار توان ثابت (CPL) بحرانی‌ترین وضعیت برای شبکه‌های DC است، زیرا با افت ولتاژ، جریان بار افزایش می‌یابد ($i_{load} = P/V_{dc}$) و

¹ Proportional-Integral Controller



شکل (۶): مقایسه پاسخ فرکانسی و کاهش دامنه نوسانات در فرکانس‌های رزونانس

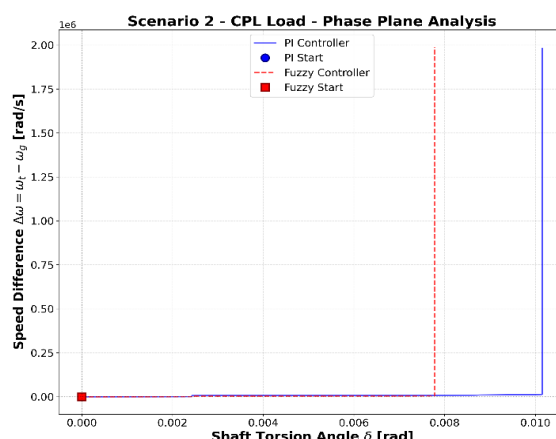
در مجموع روش پیشنهادی، با ایجاد سازوکار تطبیق برخط، همزمان سه مشکل اصلی شبکه DC با منبع باد را هدف قرار می‌دهد: (۱) کاهش اثر امپدانس تفاضلی منفی CPL، (۲) افزایش میرایی مودهای پیچشی توربین دو جرمی، و (۳) جلوگیری از ظهور پیک‌های رزونانسی در پاسخ فرکانسی باس DC.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل و بهبود پایداری سیستم‌های تبدیل انرژی باد در شبکه‌های DC ارائه شد که به‌صورت همزمان دینامیک‌های مکانیکی توربین دو جرمی، مدل لینک DC و رفتار بارهای مختلف (به‌ویژه بار توان ثابت با امپدانس تفاضلی منفی) را پوشش می‌دهد. دو دستاورد اصلی تحقیق عبارت‌اند از: (i) طراحی کنترل‌کننده فازی-تطبیقی برای تنظیم برخط بهره‌های حلقه ولتاژ باس DC بدون نیاز به خطی‌سازی دقیق سیستم و (ii) توسعه دیدگاه تحلیل پایداری هیبریدی که امکان تبیین همزمان نتایج در حوزه زمان (پاسخ گذرا و صفحه فاز) و حوزه فرکانس (پاسخ FFT و شناسایی رزونانس‌ها) را فراهم می‌سازد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی در هر سه سناریوی بار، دامنه نوسانات ولتاژ باس DC را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. به‌صورت مشخص، در سناریوی بحرانی CPL که از نظر پایداری دشوارترین حالت برای شبکه‌های DC است، کنترل‌کننده PI به‌دلیل بهره ثابت و کاهش میرایی مؤثر ناشی از امپدانس تفاضلی منفی، پاسخ مرزی و نوسانی ایجاد می‌کند؛ در حالی که کنترل‌کننده فازی-تطبیقی با پیاده‌سازی مکانیزم «افزایش سریع بهره برای مهار افت ولتاژ» و سپس «تعدیل بهره برای جلوگیری از نوسان پایدار»، دامنه نوسان ولتاژ را از ۷۶۷.۳ به ۷۱۹.۲ (کاهش ۷۱.۴٪) و فراجهش را از ۷۳۴.۹ به ۷۵.۶ کاهش داده است. علاوه بر بهبود پاسخ الکتریکی، کاهش نوسانات θ_s نشان داد که روش پیشنهادی توانسته انرژی نوسانی مودهای پیچشی را نیز مستهلک کرده و تنش‌های شفت را کاهش دهد؛ بنابراین، بهبود

۲۳.۴٪) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فقط روی خروجی الکتریکی اثر نگذاشته، بلکه با کاهش تبادل انرژی نوسانی بین دو جرم، از تشدید مود پیچشی جلوگیری کرده است. این موضوع از آن جهت مهم است که مودهای پیچشی کم‌میرایی، در صورت تحریک، می‌توانند به‌طور غیرمستقیم جریان مبدل و توان تزریقی را نوسانی کرده و دوباره ولتاژ باس DC را تحریک کنند؛ بنابراین کاهش θ_s به معنی افزایش میرایی کل سیستم الکترومکانیکی است.



شکل (۷): تحلیل صفحه فاز (Phase Plane) نشان‌دهنده همگرایی سریع تر متغیرهای مکانیکی

نتیجه فوق در نمودار صفحه فاز نیز قابل مشاهده است؛ فشردگی مسیر حالت‌ها و همگرایی سریع‌تر به نقطه تعادل بیانگر آن است که انرژی نوسانی سیستم با نرخ بیشتری مستهلک می‌شود و پاسخ گذرا از حالت «نوسانی ممتد» به حالت «میرا با زمان نشست کمتر» نزدیک شده است.

ج) تحلیل فرکانسی و تبیین حذف پیک‌های رزونانسی:

تحلیل طیفی ولتاژ در شکل (۶) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی در عمل مشابه یک میراکننده فعال عمل می‌کند. کاهش دامنه نوسانات در فرکانس‌های رزونانس مکانیکی (به‌خصوص ۲۰ Hz و ۳۰ Hz) به ترتیب ۵۳.۲٪ و ۸۱.۲٪ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته از تقویت مودهای پیچشی در حلقه ولتاژ DC جلوگیری کند. از دید کنترلی، این نتیجه به معنی افزایش حاشیه پایداری در حوزه فرکانس و کاهش حساسیت سیستم به تحریکات سینوسی در بازه مودهای طبیعی است.

- Journal, vol. 17, no. 1, pp. 1375-1382, 2023/03 2023, doi: 10.1109/jysyst.2022.3181099.
- [3] A. M. I. Mohamad, M. Fakhari Moghaddam Arani, and Y. A.-R. I. Mohamed, "Investigation of Impacts of Wind Source Dynamics and Stability Options in DC Power Systems With Wind Energy Conversion Systems", IEEE Access, vol. 8, pp. 18270-18283, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2966363.
- [4] C. Chen, H. Liu, Y. Xiao, F. Zhu, L. Ding, and F. Yang, "Power generation scheduling for a hydro-wind-solar hybrid system: A systematic survey and prospect", Energies, vol. 15, no. 22, p. 8747, 2022.
- [5] a. khan ahmadi, m. m. soleimani, r. ghaffarpour, and s. zamanian, "Optimal planning of renewable energy systems with considering uncertainty and LPSP concept: A case study", (in eng) Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 19, no. 1, pp. 97-110, 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.1.97.
- [6] M. Arshad, O. Beik, M. O. Manzoor, and M. Gholamian, "Stability analysis via impedance modelling of a real-world wind generation system with AC collector and LCC-based HVDC transmission grid", Electronics, vol. 13, no. 10, p. 1917, 2024.
- [7] F. Ahmed, D. Al Kez, S. McLoone, R. J. Best, C. Cameron, and A. Foley, "Dynamic grid stability in low carbon power systems with minimum inertia", Renewable Energy, vol. 210, pp. 486-506, 2023.
- [8] H. Ghanavati and A. Jalilian, "A New Method to Study Aggregation Effect of Harmonic Current Emissions in a Wind Farm Based on Type-III Wind Turbine Average Modeling", (in eng) Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 16, no. 1, pp. 11-19, 2019. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-862-en.html>.
- [9] A. Elkodama, A. Ismaiel, A. Abdellatif, S. Shaaban, S. Yoshida, and M. A. Rushdi, "Control methods for horizontal axis wind turbines (HAWT): State-of-the-art review", Energies, vol. 16, no. 17, p. 6394, 2023.
- [10] A. Sousa, B. Grasel, and J. Baptista, "Stability Analysis of DC Microgrids: Insights for Enhancing Renewable Energy Integration, Efficiency and Power Quality", Applied Sciences (2076-3417), vol. 14, no. 24, 2024.
- [11] D. Zhang et al., "A comprehensive overview of modeling approaches and optimal control strategies for cyber-physical resilience in power systems", Renewable Energy, vol. 189, pp. 1383-1406, 2022.
- [12] M. Y. A. Khan, H. Liu, Y. Zhang, and J. Wang, "Hybrid AC/DC Microgrid: Systematic Evaluation of Interlinking Converters, Control Strategies, and Protection Schemes: A Review", IEEE Access, vol. 12, pp. 160097-160107, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3485001.

پایداری صرفاً محدود به باس DC نبوده و کل سامانه الکترومکانیکی را در بر می گیرد.

از دید حوزه فرکانس، کاهش دامنه در فرکانس‌های رزونانس (به‌ویژه 20 Hz و 30 Hz) بیانگر افزایش حاشیه پایداری و کاهش حساسیت سیستم به تحریک مدهای طبیعی مکانیکی است. این نکته برای کاربردهای میکروگرید DC با نفوذ بالای تجدیدپذیر اهمیت ویژه دارد، زیرا بارهای پویا و اغتشاشات مکرر می‌توانند رزونانس‌های کم‌میرایی را فعال کنند. بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهنمای طراحی کنترل و تنظیم پارامترها برای سیستم‌های WECS متصل به شبکه‌های DC مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادهای برای تحقیقات آتی به شرح زیراند:

- پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده فازی-تطبیقی در یک بستر آزمایشگاهی (Hardware-in-the-Loop یا نمونه واقعی) و ارزیابی عملکرد در حضور نویز اندازه‌گیری، اشباع‌ها و تأخیرهای نمونه‌برداری.
- بررسی حساسیت روش پیشنهادی نسبت به تغییرات سرعت باد، تغییرات پارامترهای مکانیکی (K_s ، میرایی‌ها) و تغییرات ظرفیت لینک DC.
- توسعه چارچوب برای حالت چندمنبعی (چند توربین/چند مبدل) در میکروگریدهای DC و تحلیل اندرکنش امپدانس بین مبدل‌ها و بارهای CPL.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] A. Mirzaei, M. Rezvanyvardom, and S. Heydari, "Analysis, Design and Implementation of a Non-Isolated Soft Switched Quasi Z-Source DC-DC Converter with High Voltage Gain", (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 16, no. 3, pp. 13-24, 2019. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-629-fa.html>.
- [2] M. Eidiani, "A New Hybrid Method to Assess Available Transfer Capability in AC-DC Networks Using the Wind Power Plant Interconnection", IEEE Systems

¹ Wind Energy Conversion System

² Horizontal Axis Wind Turbine

³ High-voltage direct current

⁴ High-voltage direct current

⁵ Voltage Source Converter

⁶ dq rotating reference frame

⁷ Constant Power Load