

Analyzing the Interaction Effects of Controllers Loop in VSC-MTDC System Integrating Wind Farms

Ali Ziaei¹, Reza Ghazi², Roohalamin Zeinali Davarani³

¹ PhD Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ali.ziayi@alumni.um.ac.ir

² Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

rghzi@um.ac.ir

³ Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

r.zeinali@kgut.ac.ir

Abstract:

The use of multi-terminal high voltage direct current transmission systems (MT-HVDC), has had a significant increase in the power transmission of high-capacity power plants, especially renewable power plants. In addition to the important advantages of MTDC systems based Voltage Source Converter (VSC-MTDC), the possibility of VSC-MTDC system controllers interaction with other controllers and network devices has become one of the main concerns. Therefore, in this paper, the possibility of interaction of the MTDC system based on VSC in connection with a wind farm based on DFIG generators is comprehensively investigated and the effect of control coefficients and network parameters on system stability is presented. The results of the eigenvalue analysis show that some system components such as the vector current controller of the VSC and HVDC transmission line impedance have a significant impact on the damping of the system modes. So the inaccurate design of the VSC-MTDC system can lead to the instability of system oscillations. For stable operation of the system, an optimal range of controller coefficients is provided.

Keywords: Eigenvalue Analysis, Interaction, DFIG Induction Generator, VSC-MTDC Transmission System.

Article Type: Research

Received: 29. 09. 2024

Revised: 10. 11. 2024

Accepted: 04. 12. 2024

Corresponding author: Reza Ghazi

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.



1. Motivation of the work

Power transmission systems based on MT-HVDC technologies are anticipated to be key elements in the future of power systems. Given that each station is equipped with electronic converters, the behavior of MT-HVDC networks is influenced by various control strategies. With the increasing connection of offshore wind farms to HVDC lines via DC links, there is a growing need for comprehensive analyses in this area. In the system studied in this article, the wind farm is connected to an existing HVDC line through a DC link, which serves as a method for integrating wind power plants into the grid. However, a comprehensive analysis to assess potential interaction in this design has not yet been conducted. Therefore, this paper examines the possibility of interaction between the VSC-HVDC transmission system controllers when connected to a wind farm. Additionally, the impact of weather conditions on electrical network parameters has been explored in various references. Severe temperature differences between cold and warm seasons, occurrences of events such as lightning, and high humidity can affect the resistance and reactance values of network components by damaging them. Furthermore, the continuous expansion of the electrical grid not only influences the short-circuit ratio (SCR) but also affects the configuration and parameters of the network. Thus, it is evident that selecting an appropriate value for controller coefficients is not reasonable or logical in just one specific scenario of electrical network parameters; rather, it is better to consider a suitable range for controller coefficients based on an acceptable range of network parameters.

2. Contributions

There are several methods to analyze the stability of power networks with the presence of electronic power converters. Below are some of the methods used:

- 1- Eigenvalue analysis method
- 2- Impedance analysis method
- 3- Open-loop modal method
- 4- Amplitude-phase dynamics method
- 5- Transfer function method
- 6- Time domain simulation

All the methods can reflect the relationship between the instability states and the specific parameters of the devices in the power system and specifically the power electronic converters. However, the first and second approaches are used more than other methods among references.

In the eigenvalue analysis method, we first obtain the dynamic equations of the power system, which are often non-linear. These equations are linearized around the equilibrium point as $\dot{X} = AX$. Then, using the eigenvalues of matrix A (Jacobin matrix), we differentiate all the modes of the system. Finally, using the eigenvalue

analysis, we investigate the effect of different conditions of the system components on the damping of the modes.

In the impedance analysis method, the entire network, including the inverter, converter, DC transmission line, etc., is simplified with a constant DC voltage source. In other words, the impedance method turns the stability problem into a control problem, and therefore it uses the Nyquist stability criterion to determine the system stability. Using this method in systems with multiple inputs and multiple outputs is associated with many difficulties in using the Nyquist stability criterion.

In the time domain simulation, investigating the effect of the parameters of the studied system on the output response of different parts of the system requires a lot of time. Of course, as the system becomes larger and so the simulation time becomes more complicated and longer, it is practically not possible to draw a general conclusion about the interaction between the components.

The eigenvalue analysis method has the feasibility for execution in large systems and it is possible to determine the type of interaction based on the behavior of the system modes. Therefore, in this paper, this analytical method is used to investigate the stability of the power system and detect the potential interaction between system components.

3. Procedures

This study has tried to completely investigate the interaction effect in the VSC-MTDC system based on VSC converters in connection to the wind farm by using the modal analysis method. For this purpose, a small signal model of all system components is provided, and using eigenvalue analysis the interaction phenomenon between system components such as VSC-MTDC controllers, wind farm controllers, and networks are studied carefully. In addition, the obtained analytical results are verified by time domain simulation. In the end, in order to ensure that there is no destabilizing interaction in the performance of the system components, the appropriate design range of the system controllers has been obtained.

4. Findings

The important results and innovations presented in this paper are as follows:

- 1- The controllers of the VSC₁ and VSC₂ converters in the HVDC transmission system, as well as the controllers of wind farms, can significantly impact the damping of the system. The influence of VSC controllers and wind farms on system stability is considerable, and improper design of these controllers can lead to system instability. For instance, the vector control of VSC converters and the active and reactive power controllers of DFIG generators have a greater impact on the damping of system modes and can potentially cause instability under certain conditions. Therefore, precision in the design of these controllers appears to be essential.

- 2- Some components of the network play a crucial role in maintaining system stability. Improper design of electrical parameters in the initial stages or changes to these parameters for any reason after design can lead to conditions that expose the system to instability. This issue becomes particularly evident when the equivalent impedance of the wind farm (R_w, X_w) increases. Such an increase can significantly affect system stability and lead to instability. Furthermore, the issue of system instability can also occur at low values of the wind farm transformer impedance (R_t, X_t) and low values of the HVDC transmission line impedance (R_{HVDC}, X_{HVDC}). Therefore, the importance of careful design and proper management of electrical parameters in maintaining system stability is undeniable.
- 3- The optimal range of the system controller coefficients under study has been determined to ensure system stability. It is important to note that these ranges have been established in such a way as to minimize the likelihood of interaction between controllers while also ensuring that changes in network parameters do not threaten system stability as much as possible.

parameters. At the end of the article, appropriate ranges for selecting controller parameters are established to ensure system stability.

5. Conclusion

The stable operation of the VSC-MTDC transmission system requires a thorough examination of potential interaction among all converters, controllers, and other components of the power system. In this study, modal analysis was employed to investigate the effects of controller loop interaction in the VSC-MTDC transmission system. The results indicate that certain controllers have a significant impact on system stability, and incorrect selection of gains can lead to reduced damping and, in the worst-case scenario, result in system instability. In particular, the vector control of VSC converters and the active and reactive power controllers of DFIG generators have a greater influence on the damping of system modes and can lead to instability under certain conditions. Therefore, precision in the design of these controllers is deemed essential. Additionally, the results show that, beyond careful controller design, changes in uncontrollable system parameters must also be considered; as time progresses and the network expands, some uncontrollable parameters may change, potentially creating conditions conducive to system instability. Among the uncontrollable parameters, the impedance of the wind farm transformer (R_t, X_t), the equivalent impedance of the wind farm (R_w, X_w), AC line impedances, and HVDC transmission line impedance have the most significant effects on system damping, with the system potentially becoming unstable for certain values of these

بررسی اثرات تداخل حلقه‌های کنترل کننده در سیستم‌های انتقال VSC-MTDC متصل به مزارع بادی

علی ضیائی^۱، رضا قاضی^۲، روح الامین زینلی داورانی^۳

۱- دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران

ali.ziayi@alumni.um.ac.ir

۲- استاد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران

rghzi@um.ac.ir

۳- استاد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - کرمان - ایران

r.zeinali@kgut.ac.ir

چکیده: استفاده از سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالای چند پایانه‌ای (MT-HVDC) به دلیل وجود مزایای فراوان، افزایش چشمگیری در انتقال توان نیروگاه‌ها به خصوص نیروگاه‌های تجدیدپذیر داشته است. در این میان، احتمال بروز تداخل کنترل کننده‌های سیستم انتقال MT-HVDC مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC-MTDC) با سایر کنترل کننده‌ها و ادوات شبکه به یکی از نگرانی‌های اصلی تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که تحقیقات نشان داده است که سیستم‌های قدرت تحت تنش در پی ایجاد اغتشاشات، رفتارهای دینامیکی پیچیده‌ای را از خود بروز می‌دهند و همین موضوع می‌تواند پایداری سیستم قدرت را به مخاطره بیندازد. در این مقاله، با پیاده‌سازی مدل سیگنال کوچک سیستم VSC-MTDC در اتصال به یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتورهای DFIG و با استفاده از تحلیل مقدار ویژه به بررسی احتمال بروز تداخل در سیستم‌های فوق پرداخته و در ادامه، تأثیر ضرایب کنترل کننده و پارامترهای شبکه بر میرایی مدها ارائه شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که پارامترهای کنترل کننده جریان برداری مبدل VSC و امپدانس خط انتقال HVDC تأثیر قابل توجهی بر میرایی مدهای نوسانی داشته به گونه‌ای که انتخاب ناصحیح این مقادیر می‌تواند منجر به ناپایداری مدهای نوسانی گردد. در انتها، به منظور عملکرد پایدار سیستم، بازه بهینه‌ای از ضرایب کنترلی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل مقدار ویژه، تداخل، ژنراتور القایی DFIG، سیستم انتقال VSC-MTDC

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رضا قاضی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت مدرن امروزی، توجهات زیادی جهت تامین انرژی الکتریکی مطمئن و پاک با حرکت از سمت نیروگاه‌های متمرکز به سمت ترکیبی از نیروگاه‌های متمرکز و پراکنده انجام شده است. [۱]. به عنوان نمونه، در دهه گذشته (۲۰۱۱-۲۰۲۰)، سهم انرژی تجدیدپذیر از ظرفیت تولید برق در چین از ۲۵٫۲٪ به ۴۰٫۶٪ افزایش یافته است [۲]. مطالعات نشان داده است که مناسب‌ترین سیستم انتقال توان، استفاده از شبکه انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) می‌باشد. به بیان بهتر، تمایل به انتقال توان بالا از یک طرف و امنیت پایین خطوط AC از طرفی دیگر منجر به افزایش استفاده از سیستم‌های HVDC به صورت موازی با خطوط AC موجود شده است. بنابراین، بسیاری از سیستم‌های قدرت، ترکیبی از هر دو سیستم AC و HVDC را برای سیستم انتقال آینده پایهریزی کرده‌اند [۳]. به طور کلی دو نوع سیستم انتقال HVDC وجود دارد: مبدل‌های کموتاسیون خط (LCC) و مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC) [۴ و ۵]

رایج‌ترین فن‌آوری مورد استفاده، فن‌آوری مبدل‌های کموتاسیون خط است [۶]. از زمانی که اولین پروژه تجاری HVDC (لینک Gotland HVDC) در سال ۱۹۵۴ به بهره برداری رسید، فناوری LCC-HVDC برای بیش از شصت سال توسعه یافته است. با این حال، ترستورهای مورد استفاده در مبدل‌های LCC فقط می‌توانند روشن شوند و خاموش شدن آنها وابسته به ولتاژ شبکه است. این اشکال باعث می‌شود که مبدل LCC نتواند به یک شبکه AC ضعیف متصل شود. همچنین، اینورتر LCC ممکن است در هنگام بروز خطا در شبکه AC دچار اختلال کموتاسیون شود. علاوه بر این، سیستم انتقال LCC-HVDC در هنگام انتقال توان اکتیو، مقدار زیادی توان راکتیو مصرف می‌کند [۷].

به عنوان یک جایگزین، فناوری VSC-HVDC در حدود سال ۱۹۹۰ ارائه شد. مبدل‌های VSC با ادوات کلیدزنی (به عنوان مثال IGBT) ساخته شده است که می‌توانند هم روشن و هم خاموش شوند. مبدل‌های VSC امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو و تنظیم پیوسته ولتاژ را فراهم کرده و نقصانی در کموتاسیون برای این مبدل‌ها وجود نداشته و نیازی به معکوس‌سازی ولتاژ جهت معکوس کردن توان ندارند و بنابراین اتصال به شبکه AC ضعیف نیز تحت این شرایط ممکن می‌شود [۶ و ۸]. در سال‌های اخیر، صنعت برق علاقه بیشتری به استفاده از سیستم‌های انتقال VSC-HVDC جهت اتصال مزارع بادی به شبکه به دلیل برطرف کردن نقاط ضعف سایر رقبا و ارائه مزایای قابل توجه نشان داده است [۹-۱۱]. با این حال، در مقایسه با سیستم انتقال سنتی LCC-HVDC، سیستم VSC-HVDC دارای معایبی همچون هزینه نصب بالاتر، توانایی انتقال توان کمتر و تلفات بیشتر نیز هستند [۱۲]. اتحادیه اروپا برای دستیابی به هدف ۲۰۵۰ در زمینه سهم تولید انرژی تجدیدپذیر، ناگزیر به برقراری ارتباطات بیشتر میان کشورها و مناطق مختلف خواهد بود. شبکه‌های HVDC چند ترمینالی (تحت

عنوان MT-HVDC) به عنوان فناوری‌های نویدبخش برای پیاده‌سازی چنین مفهومی ظهور کرده‌اند. این شبکه‌ها بر پایه مبدل‌های کنترل پذیر طراحی شده‌اند که نه تنها امکان انتقال برق را فراهم می‌کنند، بلکه می‌توانند از شبکه‌های AC نیز پشتیبانی نمایند تا عملکردی ایمن و پایدار را تضمین کنند [۱۳]. در مرجع [۱۴] نیز توپولوژی‌های مختلفی که می‌توانند برای انتقال توان از مزارع بادی بزرگ دریایی با استفاده از سیستم‌های انتقال HVDC چند ترمینالی مورد استفاده قرار گیرند، بررسی و با استفاده از معیارهای متعددی تحلیل و مقایسه شده‌اند.

با ازدیاد استفاده از سیستم‌های مختلف HVDC مشکلات عملیاتی متعددی همچون اضافه ولتاژ و ناپایداری سیگنال کوچک به ویژه در اتصال به شبکه AC ضعیف ایجاد می‌شود [۱۵ و ۱۶]. در مراجع متعدد، پایداری سیستم‌های قدرت AC به طور گسترده‌ای مورد بحث قرار گرفته است. این مطالعات همچنین شامل سیستم‌های HVDC و مشارکت احتمالی آنها در بهبود پایداری سیستم‌های قدرت می‌شود [۶]. در مراجع [۲۰-۱۷] به بررسی تداخل در سیستم AC-DC مبتنی بر مبدل‌های LCC-VSC پرداخته شده است. مرجع [۲۱] یک مدل دینامیکی سیگنال کوچک را برای یک شبکه HVDC مبتنی بر مبدل چند سطحی ارائه می‌کند و سپس به طور سیستماتیک مدهای نوسانی غالب را شناسایی کرده و تمایل آنها به پدیده‌های ناپایداری را کمی و در نهایت راهکاری مناسب ارائه می‌کند.

در مرجع [۲۲] تداخلات دینامیکی شبکه‌های HVDC چند ترمینالی متصل به مزارع بادی با استفاده از یک رویکرد مدل‌سازی و حل عددی نوین انجام شده است. این چارچوب جدید از نظر مدل‌سازی بسیار جامع و انعطاف‌پذیر بوده و قادر است هر تعداد ایستگاه VSC استراتژی‌های کنترلی مختلف را برای انطباق با نیازهای شبکه AC مربوط به خود پشتیبانی کند. مرجع [۲۳] به بررسی تداخل کنترل کننده‌های مورد استفاده در سیستم‌های قدرت شامل چندین مبدل VSC پرداخته و اشاره کرده است که در صورت قرارگیری تمامی کنترل کننده‌ها در مد کنترل ولتاژ AC و مد کنترل توان راکتیو، به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان تداخل در سیستم رخ خواهد داد. در مرجع [۲۴] به بیان اثرات مخرب حلقه‌های کنترلی موجود در سیستم‌های مبتنی بر VSC پرداخته و با استفاده از تکنیک ∞H روشی را برای طراحی کنترل کننده‌های مورد استفاده جهت کاهش اثرات منفی آنها ارائه کرده است. مرجع [۲۵] با نگاهی متفاوت به ارزیابی اقتصادی سیستم‌های VSC-HVDC در اتصال به مزارع بادی پرداخته و موثرترین ظرفیت نصب مزرعه بادی را نیز از دیدگاه اقتصادی تعیین کرده است. مرجع [۲۶] نیز به با استفاده از یک روش تحلیل جدید به بررسی نوسانات زیر/فوق سنکرون (SSO) در سیستم‌های مبتنی بر ژنراتورهای PMSG پرداخته و اشاره کرده است که کاهش خروجی توربین‌های بادی و پهنای باند PLL می‌تواند میرایی سیستم را افزایش داده و خطر SSO را کاهش دهد.

بهینه‌سازی استوایی گوریل برای طراحی و تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده‌های خطوط انتقال HVDC اقدام کرده‌اند.

در مرجع [۴۲] طرح‌های کنترل متنوعی جهت بررسی رفتار مبدل‌های VSC در راستای ادغام مزارع بادی دریایی با شبکه ساحلی پیاده‌سازی و تحلیل شده است. مرجع [۴۳] به بررسی یک استراتژی کنترلی جدید برای مزارع بادی متصل به شبکه AC از طریق لینک VSC-HVDC پرداخته است. در مرجع اخیر، انواع مختلفی از سناریوها، شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند و توانایی این استراتژی در تنظیم ولتاژ در سناریوهای متعدد به طور کامل نشان داده شده است.

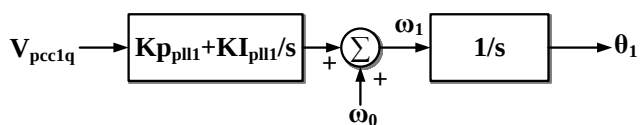
تاثیرگذاری شرایط جوی بر پارامترهای شبکه برق در مراجع مختلفی بررسی شده است [۴۴-۴۶]. مرجع [۴۶] اشاره کرده است که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲، ۸۰ درصد از قطعی‌های برق در مقیاس بزرگ به دلیل آب و هوای سخت بوده است. اختلاف دمای شدید بین فصول سرد و گرم سال، وقوع حوادثی همچون صاعقه، گردباد، رطوبت شدید، یخ زدگی و ... می‌تواند با آسیب رسانی به المانهای شبکه برق و یا حتی حذف آنها (هر چند برای مدتی) بر پارامترهای خطوط انتقال برق و بالتبع بر مقادیر مقاومت و راکتانس تونن شبکه اثرگذار باشد. مضاف بر اینکه گسترش روزافزون شبکه برق علاوه بر تاثیر گذاری بر سطح اتصال کوتاه شبکه برق (SCR) بر آرایش شبکه و بالتبع پارامترهای آن نیز تاثیر گذار خواهد بود. به عنوان مثال، تغییر آرایش خطوط توزیع بر روی یک فیدر در طول دوره بهره برداری، تغییر چیدمان کابل‌های برق، تعمیرات مختلف اعمال شده بر روی شبکه شامل تعویض سیمها یا کابل‌های قدیمی و جایگزینی با سیمها یا کابل‌های با سطح مقطع و ساختار متفاوت، اضافه یا کم شدن تعداد خطوط انتقال بر روی یک دکل برق و ... همگی بر پارامترهای شبکه (راکتانس و ادمیتانس) تاثیرگذار است. لذا بدیهی است که انتخاب یک عدد مناسب برای ضرایب کنترل کننده‌ها تنها در یک حالت خاص از پارامترهای شبکه برق صحیح و منطقی به نظر نمی‌رسد و بهتر است که بازه مناسبی برای ضرایب کنترل کننده‌ها با توجه به دامنه قابل قبولی از پارامترهای شبکه در نظر گرفته شود.

در این مطالعه سعی شده است که با بهره‌گیری از روش تحلیل مدال به بررسی اثر تداخل ناشی از کنترل کننده‌های به کار رفته در سیستمهای انتقال ولتاژ مستقیم چند پایانه‌ای مبتنی بر مبدل‌های VSC (VSC-MTDC) در اتصال به مزرعه بادی با دیگر اجزای سیستم پرداخته شود؛ به علاوه، اثر تداخل در مورد کنترل کننده‌های موجود در ژنراتورهای مزرعه بادی نیز بررسی شده است. همچنین، تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده (به ازای یک مقدار ثابت برای پارامترهای شبکه) و تاثیر تغییر پارامترهای شبکه (به ازای یک مقدار ثابت برای کنترل کننده‌های سیستم) بر روند میرایی مدها ارائه شده است. در ادامه و با استفاده از تحلیل‌های صورت گرفته، بهترین بازه برای ضرایب کنترل کننده‌های سیستم به منظور دستیابی به حداکثر میرایی برای مدها

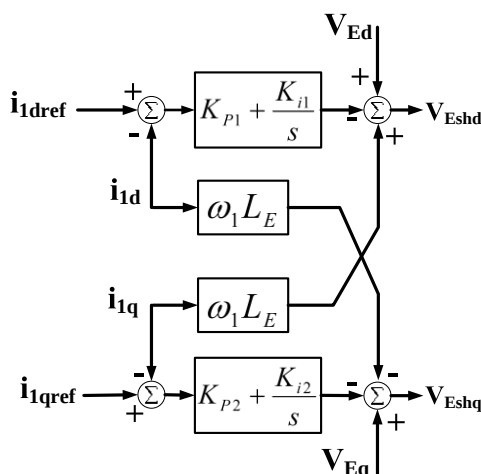
تاثیر انتخاب درست ضرایب کنترل کننده‌ها به منظور تاثیرگذاری بیشینه بر پایداری مدها نیز در برخی مقالات بررسی شده است. مراجع [۲۷] و [۲۸] به ارائه روش کنترل هماهنگ در سیستمهای هیبریدی LCC-MMC HVDC پرداخته‌اند. مرجع [۲۹] با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر تحلیل حساسیت مقادیر ویژه و در قالب یک رویه تکراری، به ارائه بهترین مقدار پارامترهای بهینه کنترل کننده برای مبدل‌های با فرکانس کلیدزنی پایین پرداخته است. مرجع [۳۰] از روش کنترل پیش بین برای افزایش پایداری گذرا و تنظیم فرکانس سیستمهای چندماشینی استفاده کرده است. مرجع [۳۱] به بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم انتقال LCC-HVDC پرداخته است. این مرجع با استفاده از مدل دینامیکی اصلاح شده برای شبکه انتقال، تاثیر پارامترهای کنترل را بر پایداری سیگنال کوچک سیستم با بهره‌گیری از تحلیل مقادیر ویژه بررسی کرده است. مرجع [۳۲] نیز روشی جدید برای معادلسازی و شناسایی سیستم قدرت بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه کرده است. روش پیشنهادی با تخمین دقیق مدهای نوسانی، بستری مناسب برای ارائه الگوریتم بهینه کنترلی به منظور هماهنگی پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم کننده خودکار ولتاژ فراهم می‌کند. در مرجع [۳۳]، تحلیل میرایی مدها و احتمال بروز تداخل در یک سیستم LCC-VSC-HVDC چند ترمینالی متصل به یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور DFIG با استفاده از تحلیل مدال خطی انجام شده و به علاوه، بازه مناسب ضرایب کنترل کننده‌ها به منظور دست یابی به میرایی بیشینه مدها و پایداری حداکثر سیستم مورد مطالعه پرداخته شده است. در ادامه، در این مقاله تاثیر پارامترهای الکتریکی شبکه بر میرایی مدها نیز بررسی شده است.

در این میان، مراجع متعددی نیز به بررسی پارامترهای بهینه کنترلی در سیستمهای HVDC متصل به شبکه AC ضعیف پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، مرجع [۳۴] با استفاده از مدل گذاری الکترومغناطیسی بهترین مقدار ضرایب کنترل کننده‌های PI مورد استفاده در سیستم MIHVDC را ارائه کرده است. مرجع [۳۵] نیز با اصلاح الگوریتم مرجع [۲۹] و اضافه کردن میرایی مدهای غالب در تابع هدف به منظور دستیابی به میرایی کافی برای مدهای نوسانی در سیستم H-MIDC متصل به شبکه AC ضعیف پرداخته است. مرجع [۳۶] با در نظر گرفتن شاخص درجه دوم و مشخصه نسبت میرایی، یک تابع هدف برای ارزیابی پایداری سیستم ایجاد و یک روش بهینه‌سازی و پیکربندی برای پارامترهای کنترلی سیستم HVDC هیبرید در مواجهه با شبکه AC ضعیف با استفاده از روش مونت کارلو ارائه کرده است. در مرجع [۳۷] بازه پارامترهای کنترل کننده مبدل‌های سیستم انتقال MMC-HVDC برای اطمینان از پایداری سیستم بر اساس محدوده‌های میرایی منفی مدهای غالب ارائه شده است. مراجع [۴۱-۳۸] نیز به ترتیب با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب، الگوریتم ترکیبی "جستجوی فاخته-گرگ خاکستری"، الگوریتم کلونی مورچه و الگوریتم

کوتاه مدل شده است. به علاوه، یک سیستم کنترل جریان برداری و یک فیلتر خازنی نیز لحاظ شده است. شکل (۳) سیستم کنترلی مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل (۲): PLL1 سمت مبدل VSC1 [۱۸]



شکل (۳): سیستم کنترل جریان مبدل VSC1 [۱۸]

در پیاده‌سازی معادلات دینامیکی مبدل VSC1 شش متغیر حالت برای جریان‌ها و ولتاژهای سمت مبدل، دو متغیر حالت برای PLL1 و دو متغیر حالت نیز برای کنترل کننده‌های آن به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$i_{Ed}, i_{Eq}, V_{pcc1d}, V_{pcc1q}, i_{1d}, i_{1q}, X_1, X_2, \theta_1, \omega_1 \quad (1)$$

۲-۲- خط انتقال DC

خط انتقال DC به طول ۵۰۰ کیلومتر به دو قسمت مساوی هر کدام به طول ۲۵۰ کیلومتر تقسیم شده و برای هر قسمت نیز از مدل T استفاده شده است. هشت متغیر حالت نیز به صورت زیر برای این بخش در نظر گرفته شده است.

$$V_{dc1}, V_{dc2}, V_{dc3}, V_{dc4}, I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}, I_{H4} \quad (2)$$

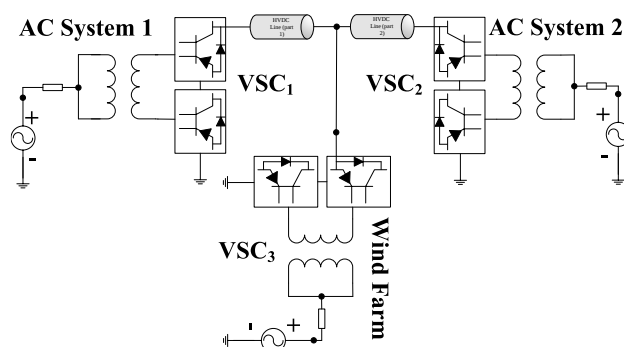
۳-۲- مبدل VSC2

در این مورد نیز مبدل VSC2 با ولتاژ توالی مثبت PCC2 از طریق PLL2 سنکرون شده است (شکل (۴)) و همانند مبدل VSC1، ترانسفورماتورهای متصل به این مبدل نیز با استفاده از یک امپدانس اتصال کوتاه مدل شده‌اند. همچنین، یک سیستم کنترل برداری نیز برای کنترل جریان و ولتاژ DC مبدل VSC2 نیز مطابق شکل‌های (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است.

ارائه شده است. بخش‌های مختلف این مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲ مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم مورد مطالعه ارائه شده است. در بخش ۳ با استفاده از روش تحلیل مدال خطی، تداخل میان کنترل کننده‌های سیستم انتقال MT-HVDC مبتنی بر مبدل‌های VSC و دیگر اجزای شبکه بررسی شده و به علاوه، تاثیر تغییر پارامترهای شبکه بر روند میرایی مدها نیز آورده شده است. تعیین بازه مناسب برای ضرایب کنترل کننده‌های سیستم مورد مطالعه در بخش ۴ آورده شده و در پایان، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۵ ارائه می‌گردد.

۲- مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه

شکل (۱) دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



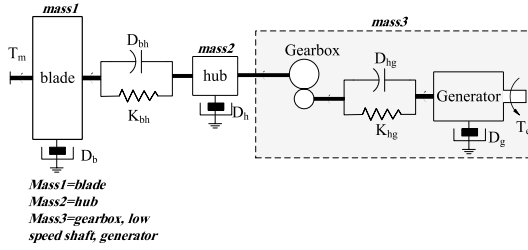
شکل (۱): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه شامل مزرعه بادی

سیستم مزبور متشکل از یک سیستم HVDC مبتنی بر مبدل‌های VSC به ظرفیت انتقال ۲۰۰۰ مگاوات و سطح ولتاژ ± 500 کیلوولت می‌باشد. یک مبدل VSC در سمت یکسوکننده و مبدل VSC دیگری نیز در سمت اینورتر واقع شده است. خط انتقال DC مابین مبدل‌های دو طرف نیز به طول ۵۰۰ کیلومتر می‌باشد [۱۸]. مزرعه بادی به ظرفیت ۱۳،۵ مگاوات متشکل از ۹ توربین بادی مبتنی بر ژنراتورهای DFIG با ظرفیت یکسان در نظر گرفته شده که ولتاژ خروجی مزرعه بادی توسط یک ترانس افزایش یافته و سپس توسط یک مبدل منبع ولتاژی VSC و با استفاده از یک لینک DC به شبکه متصل می‌شود. مزرعه بادی نیز بصورت یک توربین-ژنراتور بادی مبتنی بر DFIG مدل شده و در معادل‌سازی از روش بهم‌پیوسته مرجع [۴۷] استفاده شده است.

۲-۱- مبدل یکسوساز VSC1

سیستم AC متصل به مبدل‌های یکسوساز با استفاده از مدار معادل تونن جایگزین شده است. مبدل‌های منبع ولتاژ یا به اختصار سیستم‌های VSC را می‌توان ترکیبی از مبدل‌های نیم موج دانست که مبادله توان بین منبع ولتاژ طرف DC و سیستم AC، در هر دو جهت امکان پذیر است [۱۹].

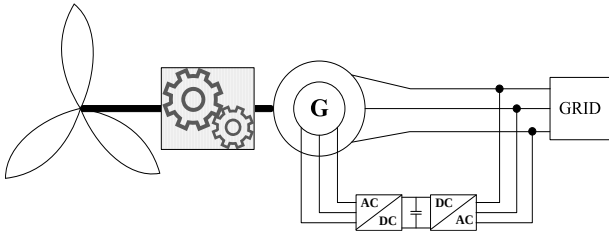
در سیستم مورد مطالعه، مبدل یکسوساز VSC1 با ولتاژ توالی مثبت PCC1 از طریق PLL1 سنکرون شده است (شکل (۲)) و ترانسفورماتور متصل به مبدل نیز با استفاده از یک امپدانس اتصال



شکل (۷): اجزای مدل سه جرمی برای سیستم توربین-ژنراتور بادی

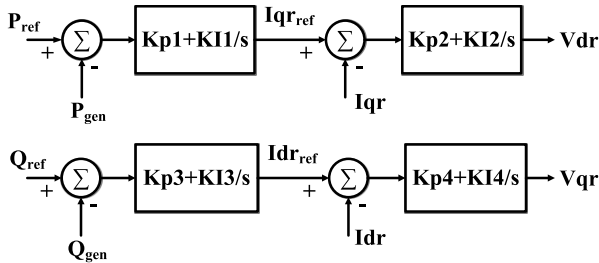
۲-۴-۲- ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)

شکل (۸) یک توربین بادی سرعت متغیر مجهز به DFIG را نشان می‌دهد. در این شکل، مدار روتور ماشین به دو مبدل و یک خازن لینک DC مجهز می‌باشد.



شکل (۸): توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)

مرجع [۴۷] نشان داده است که ارتباط بسیار قوی بین اکتیو مولفه q ولتاژ روتور (V_{qr}) و توان راکتیو (Q_{gen}) - مولفه d ولتاژ روتور (V_{dr}) وجود دارد و لذا طراحی کنترل کننده‌های DFIG نیز مبتنی بر همین مشخصات صورت می‌گیرد. شکل (۹) این کنترل کننده‌ها را نشان می‌دهد.



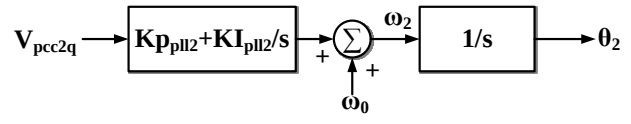
شکل (۹): کنترل کننده‌های توان اکتیو و راکتیو خروجی DFIG [۴۷]

در پیاده‌سازی معادلات دینامیکی DFIG چهار متغیر حالت برای مولفه‌های q و d جریانهای استاتور و روتور و چهار متغیر حالت نیز برای کنترل کننده‌های آن به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

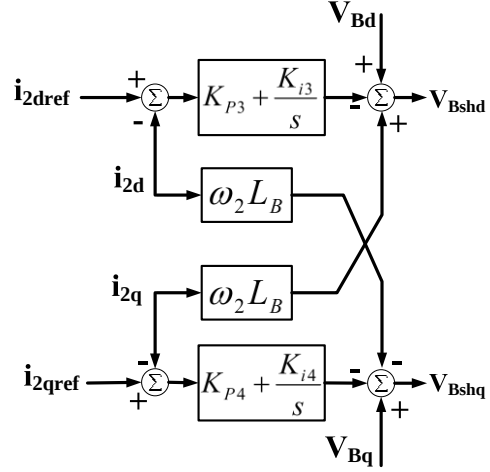
$$I_{qs}, I_{ds}, I_{qr}, I_{dr}, x_1, x_2, x_3, x_4 \quad (۵)$$

۲-۴-۳- مبدل VSC متصل به مزرعه بادی (VSC3)

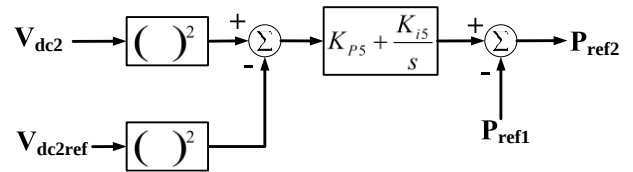
اتصال مزرعه بادی به شبکه نیز پس از افزایش ولتاژ با استفاده از یک ترانسفورماتور با بهره‌گیری از یک مبدل VSC به همراه دو کنترل کننده صورت می‌گیرد. شکل (۱۰) کنترل کننده‌های مزبور را نشان می‌دهد.



شکل (۴): سمت مبدل PLL2 [۱۸]



شکل (۵): کنترل جریان برداری مبدل VSC2 [۱۸]



شکل (۶): کنترل کننده ولتاژ DC مبدل VSC2 [۱۸]

در پیاده‌سازی معادلات دینامیکی مبدل VSC2 شش متغیر حالت برای جریان‌ها و ولتاژهای سمت مبدل، سه متغیر حالت برای کنترل کننده‌ها و دو متغیر حالت نیز برای PLL2 در نظر گرفته شده است.

$$i_{2d}, i_{2q}, V_{pcc2d}, V_{pcc2q}, i_{Bd}, i_{Bq}, x_3, x_4, x_5, \theta_2, \omega_2 \quad (۳)$$

۲-۴-۴- مزرعه بادی

همانگونه که اشاره شد، مزرعه بادی به ظرفیت ۱۳٫۵ مگاوات متشکل از ۹ توربین بادی مبتنی بر ژنراتورهای DFIG با ظرفیت یکسان در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۱- توربین بادی

توربین بادی شامل پره‌ها و گوی مرکزی، محور سرعت پایین، جعبه دنده، محور سرعت بالا و ژنراتور می‌باشد. در این مقاله جهت مطالعه ناپایداری احتمالی مدهای پیچشی، مدل سه جرمی به صورت شکل (۷) در نظر گرفته شده است. بخش مکانیکی توربین بادی با سه جرم مدل شده است و لذا شش متغیر حالت به ترتیب زیر برای آن در نظر گرفته شده است.

$$\omega_{gen}, \omega_{hub}, \omega_{blade}, \delta_{gen}, \delta_{hub}, \delta_{blade} \quad (۴)$$

$$I_{qw}, I_{dw}, m_{wr}, m_w, D_{wsh}, \delta_{wsh} \quad (۶)$$

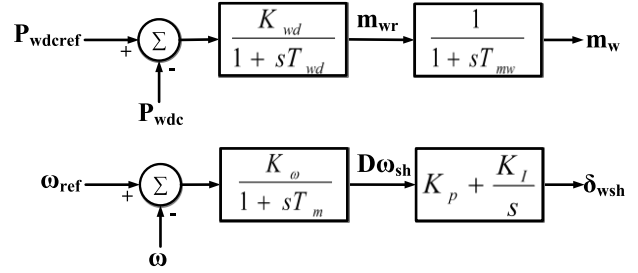
لازم به توضیح است که ترانسفورماتورهای متصل به این مبدل نیز با استفاده از یک امپدانس اتصال کوتاه مدل شده‌اند.

۴-۴-۲- لینک HVDC متصل به مزرعه بادی

برای لینک HVDC متصل به مزرعه بادی نیز دو متغیر حالت مطابق زیر در نظر گرفته شده است.

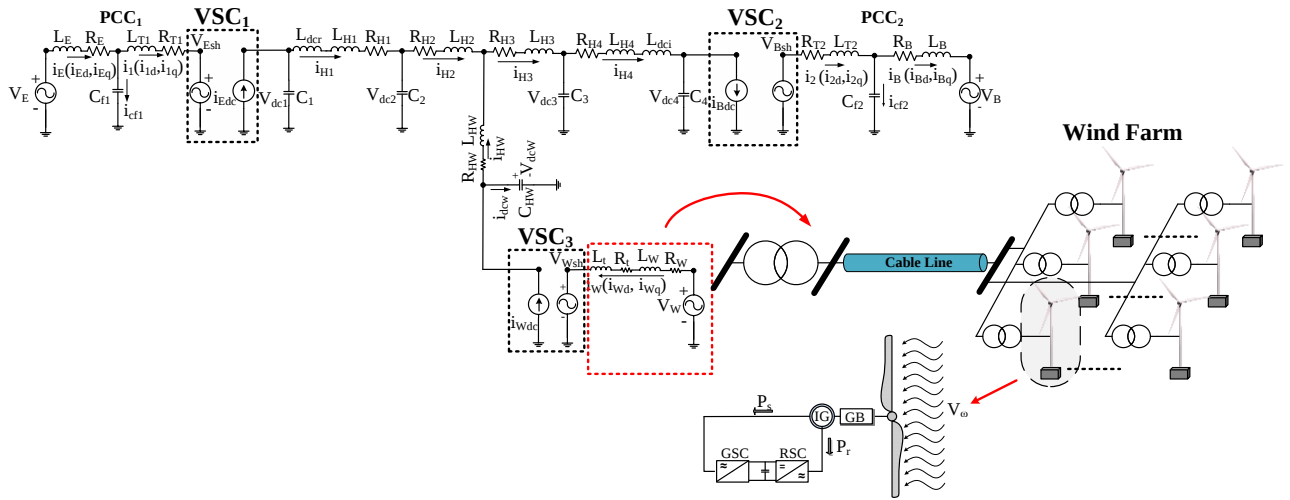
$$I_{HW}, V_{dcw} \quad (۷)$$

در مجموع برای سیستم مورد مطالعه ۵۱ متغیر حالت در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) سیستم مورد مطالعه به صورت جامع نشان داده شده است. اطلاعات مرتبط با این سیستم در بخش پیوست مقاله آورده شده است.



شکل (۱۰): کنترل کننده‌های توان اکتیو و تکمیلی مبدل VSC₃ متصل به مزرعه بادی

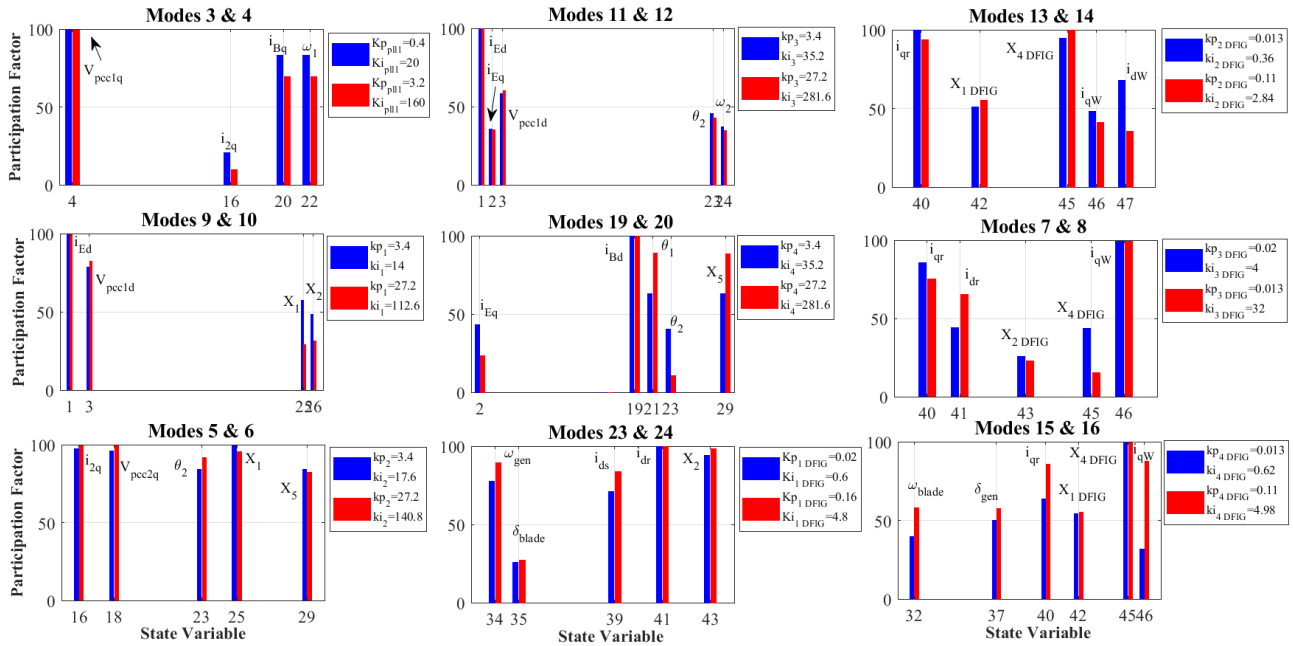
از این رو، شش متغیر حالت نیز برای مبدل VSC₃ متصل به مزرعه بادی و همچنین کنترل کننده‌های توان اکتیو و تکمیلی آن در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۱): دیاگرام تک خطی سیستم AC-DC متصل به مزرعه بادی

جدول (۱): مدهای نوسانی سیستم مورد مطالعه به همراه پارامترهای مشارکت کننده

مدها	مقدار ویژه	نسبت میرایی (%)	پارامترهای مشارکت کننده
λ_1, λ_2	-55.9±1.27i	99.9742	$i_{1d} (100\%), i_{1q} (97\%)$
λ_3, λ_4	-18.8±23.3i	62.8157	$V_{pcc1q} (100\%), i_{Bq} (77.8 \%), \omega (77.7\%), i_{2q} (14.9\%)$
λ_5, λ_6	-2.51±1.02i	92.5383	$X_1 (100\%), i_{2q} (99.4\%), V_{pcc2q} (98.4\%), \theta_2 (87\%), X_5 (84.6\%), \omega_2 (84\%), X_2 (78.3\%), X_3 (32.8\%)$
λ_7, λ_8	-0.175±3.55i	4.9274	$I_{qw} (100\%), i_{qr} (97.6\%), i_{dr} (53.3\%), X_{2dfg} (25.1\%)$
λ_9, λ_{10}	-0.03±2.76i	1.3182	$i_{Ed} (100\%), V_{pcc1d} (80.9\%), X_2 (32.1\%), X_1 (30.6\%), i_{2q} (26.6\%), V_{pcc2q} (25.7\%), i_{Bd} (25.2\%)$
$\lambda_{11}, \lambda_{12}$	-0.696±2.37i	28.0269	$i_{Ed} (100\%), V_{pcc1d} (58\%), \theta_2 (45.6\%), \omega_2 (37.3\%), X_5 (35.8\%), i_{Eq} (35.7\%), X_2 (34.2\%), i_{Bd} (27\%), V_{pcc2q} (25.8\%)$
$\lambda_{13}, \lambda_{14}$	-1.6±0.769i	90.0781	$i_{qr} (100\%), X_{4dfg} (92.7\%), i_{dw} (70.9\%), m_{wr} (55.6\%), i_{qw} (50.5\%), X_{1dfg} (49.9\%), i_{H4} (41.2\%), X_4 (41.2\%), \omega_{blade} (33.3\%), \delta_{gen} (33.3\%)$
$\lambda_{15}, \lambda_{16}$	-0.86±0.63i	80.4783	$X_{4dfg} (100\%), i_{qr} (75\%), X_{1dfg} (53.4\%), I_{qw} (50.7\%), \omega_{blade} (44.4\%), \delta_{gen} (44.1\%), i_{dw} (39.6\%), X_{3dfg} (32.3\%), X_{2dfg} (30.6\%), V_{dcw} (26.6\%), i_{dr} (26\%), i_{qs} (21.1\%), \omega_{hub} (21.1\%)$
$\lambda_{17}, \lambda_{18}$	-0.0029±0.953i	0.2611	$V_{dcw} (100\%), i_{HW} (54.4\%), V_{dc2} (46\%), i_{H2} (38\%), X_{4dfg} (37.7\%), i_{qs} (27.6\%), \omega_{hub} (27.5\%), i_{qr} (27.3\%), i_{qw} (22.2\%)$
$\lambda_{19}, \lambda_{20}$	-0.101±0.057i	87.0597	$i_{Bd} (100\%), \theta (63\%), X_5 (63\%), i_{Eq} (43\%), \theta_2 (40.2\%), V_{pcc1d} (21.2\%)$
$\lambda_{21}, \lambda_{22}$	-0.0652±0.403i	16.2198	$i_{H1} (100\%), V_{dc1} (72.3\%), i_{H2} (16.8\%), V_{dc2} (11.5\%)$
$\lambda_{23}, \lambda_{24}$	-0.0367±0.38i	11.8585	$I_{dr} (100\%), X_{2dfg} (96.7\%), \omega_{gen} (86\%), i_{ds} (79.7\%), \delta_{blade} (26.3\%), \omega_{blade} (20.5\%),$



شکل (۱۲): ضرایب مشارکت مرتبط با مدهای مختلف متناسب با دو مقدار متفاوت از ضرایب کنترل کننده

۳- تحلیل پایداری سیستم

۳. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i2} , K_{p2})، پارامترهای جریان i_2 ولتاژ V_{pcc2} ، زاویه θ_2 و پارامترهای کنترلی X_1 و X_5 دارای بالاترین میزان مشارکت در مدهای ($\lambda_{1,2}$) هستند.

۴. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i3} , K_{p3})، پارامترهای جریان سمت سیستم AC1 (i_E)، ولتاژ V_{pcc1} و زاویه θ_2 و ω_2 بیشترین مشارکت را در مدهای ($\lambda_{1,2}$) دارا هستند.

۵. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i4} , K_{p4})، پارامترهای جریان سمت سیستم AC1 (i_E)، جریان سمت سیستم AC2 (i_B)، زوایای θ_1 و θ_2 و پارامترهای کنترلی X_5 دارای بالاترین میزان مشارکت در مدهای ($\lambda_{1,2}$) هستند.

۶. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده‌های ژنراتور معادل مزرعه بادی ($K_{p1 DFIG}$, $K_{i1 DFIG}$ تا $K_{p4 DFIG}$, $K_{i4 DFIG}$)، پارامترهای مرتبط با توربین و ژنراتور DFIG (ω_{gen} ، δ_{blade} ، s_d ، s_r ، X_1 ، X_2 و $X_4 DFIG$) و لینک DC متصل به مزرعه بادی (i_W) دارای بالاترین میزان مشارکت در مدهای ($\lambda_{1,2}$)، ($\lambda_{3,4}$)، ($\lambda_{5,6}$) و ($\lambda_{7,8}$) هستند.

جدول (۱)، بر اساس تحلیل ویژه مدل سیگنال کوچک خطی، مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی مدهای نوسانی سیستم را برای نقطه کار بدست آورده شده در بخش ۲ نشان می‌دهد. جدول (۱) همچنین ضریب مشارکت نرمال شده را نیز نشان می‌دهد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشتر مدهای نوسانی سیستم دارای نسبت میرایی قابل ملاحظه‌ای می‌باشند. در این میان، میرایی مدهای نوسانی ($\lambda_{1,2}$) و ($\lambda_{1,2}$) پایین بوده و لذا امکان ناپایداری این مدها در صورت تغییر شرایط سیستم وجود دارد. به علاوه، میرایی مدهای پیچشی مزرعه بادی (مدهای ($\lambda_{3,4}$)، ($\lambda_{5,6}$) و ($\lambda_{7,8}$)) نیز ممکن است در صورت تغییر شرایط سیستم دستخوش تغییر و حتی ناپایداری شود. شکل (۱۲) ضرایب مشارکت مرتبط با مدهای مختلف را در دو حالت مختلف نشان می‌دهد. در حالت اول ضرایب کنترل کننده در مقداری برابر با ۰.۴ برابر مقدار پایه قرار داشته و در حالت دوم نیز ضرایب کنترل کننده در مقداری برابر با ۳ برابر مقدار پایه قرار دارند. در ادامه، مد با بیشترین ارتباط با ضریب کنترل کننده مربوطه ارائه شده است.

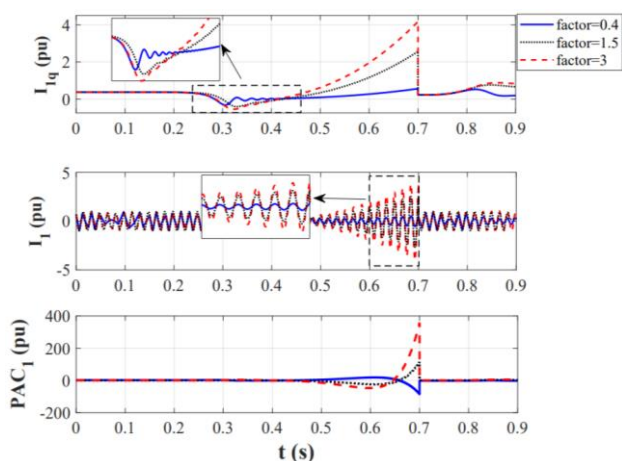
از شکل فوق مشاهده می‌شود که:

۱. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده PLL1، پارامترهای ولتاژ V_{pcc1} ، جریان i_2 ، جریان سمت سیستم AC2 (i_B) و فرکانس زاویه‌ای (ω_1) دارای بالاترین مشارکت در مدهای ($\lambda_{1,2}$) هستند.
۲. در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{p1} , K_{i1})، پارامترهای جریان سمت سیستم AC1 (i_E)، ولتاژ V_{pcc1} و پارامترهای کنترلی X_1 و X_2 بیشترین مشارکت را در مدهای ($\lambda_{1,2}$) دارا هستند.

۳-۱- بررسی تداخل بین کنترل کننده‌ها و سایر

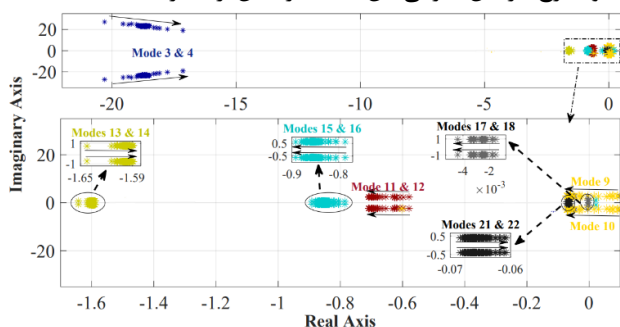
اجزای سیستم

در این بخش تاثیر کنترل کننده‌های به کار فته در سیستم مورد مطالعه بر روی پایداری سیستم بررسی و پتانسیل بروز تداخل بین اجزای سیستم تعیین شده است.



شکل (۱۴): نمودار جریان I_1 و توان سیستم PAC_1 در صورت بروز اتصال کوتاه و به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده (K_{i1} و K_{p1}) کنترل کننده K_{i2} و K_{p2}

در این بخش، کنترل کننده دوم از مبدل VSC_1 (K_{i2} , K_{p2}) را مورد بررسی قرار داده ایم. نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با افزایش پارامتر $factor$ از مقدار ۰٫۱ مدهای نوسانی $(\lambda_{12}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ با وجود تغییرات نامحسوس به سمت راست صفحه مختلط و مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ نیز به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و بالتبع مجموعه اول مدها با کاهش نامحسوسی در میرایی و مجموعه دوم با افزایش میرایی مواجه می شوند. میرایی مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ به ازای مقادیر پایین ضرایب کنترل کننده منفی بوده و به علاوه، نرخ افزایش میرایی این مدها نیز بیش از سایر مدها است.



شکل (۱۵): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i2} و K_{p2})

شکل (۱۶) نمودار جریان I_1 و توان انتقالی PAC_1 در صورت بروز اتصال کوتاه در سمت سیستم AC_1 به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده مزبور نشان می دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰٫۳ ایجاد و پس از ۴۰۰ میلی ثانیه رفع شده است. انتظار می رود با توجه به وابستگی جریان سمت سیستم AC_1 (I_1) و بالتبع توان آن (PAC_1) به مدهای ۹ و ۱۰، با افزایش مقدار ضرایب کنترل کننده مزبور میزان میرایی افزایش یابد که این موضوع در شکل زیر قابل مشاهده است.

۳-۱-۱- کنترل کننده مبدل VSC_1

کنترل کننده جریان ثابت مبدل VSC_1 همانگونه که در شکل (۳) دیده می شود دارای دو کنترل کننده PI است که در این بخش به بررسی رفتار مدهای سیستم در صورت تغییر پارامترهای این کنترل کننده ها می پردازیم. بدین منظور با استفاده از یک عامل افزایشده، پارامترهای تناسبی و انتگرالی به صورتی تغییر داده می شوند که نسبت آن ها ثابت بماند، یعنی:

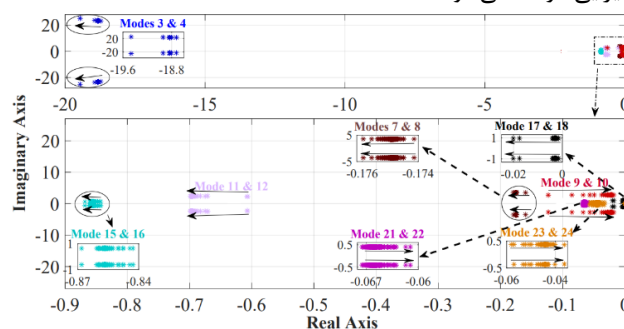
$$K_{p_{new}} = factor \times K_{p_{base}} \quad (۸)$$

$$K_{i_{new}} = factor \times K_{i_{base}}$$

در تمامی موارد زیر پارامتر $factor$ به صورت خطی بین ۰٫۱ تا ۳ تغییر داده شده است. لازم به توضیح است که زمانی که اثر تغییر یک پارامتر سیستم کنترلی بر تداخل سایر مدها بررسی می شود، دیگر پارامترهای سیستم های کنترل در مقدار مبنای در نظر گرفته شده برای آنها ثابت در نظر گرفته می شود.

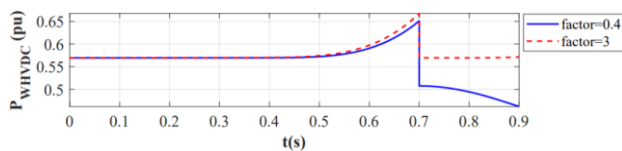
کنترل کننده K_{i1} و K_{p1}

با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده (K_{i1} و K_{p1}) بر دیگر اجزای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با افزایش پارامتر $factor$ از مقدار ۰٫۱ مدهای نوسانی $(\lambda_{12}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ با وجود تغییرات نامحسوس به سمت چپ صفحه مختلط حرکت می کنند. در این میان، تغییرات میرایی مدهای $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ بیش از سایر مدها است. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ نیز به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و با کاهش نامحسوسی در میرایی مواجه می شوند.



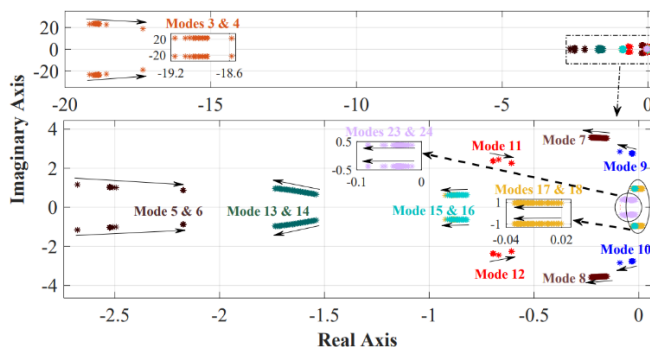
شکل (۱۳): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i1} و K_{p1})

شکل (۱۴) نمودار جریان I_1 و توان انتقالی PAC_1 در صورت بروز اتصال کوتاه در سمت سیستم AC_1 به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده مزبور نشان می دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰٫۳ رخ داده و بعد از گذشت ۴۰۰ میلی ثانیه برطرف می شود. انتظار می رود با توجه به وابستگی جریان سمت سیستم AC_1 و بالتبع توان آن به مدهای ۹ و ۱۰، با افزایش مقدار ضرایب کنترل کننده مزبور میزان میرایی کاهش یابد که این موضوع در شکل زیر قابل مشاهده است.



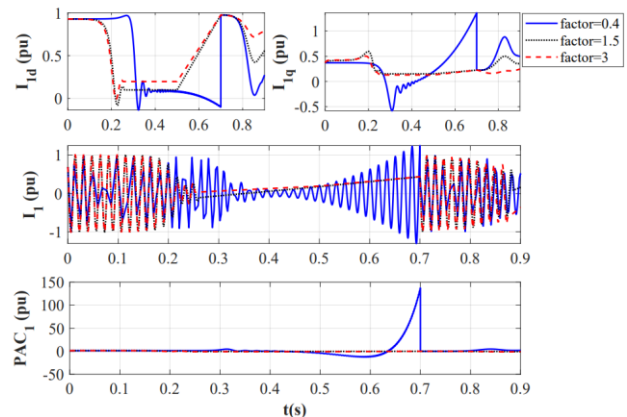
شکل (۱۸): نمودار توان خروجی مبدل VSC_3 (P_{WHVDC}) در صورت بروز اتصال کوتاه و به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده (K_{i3} و K_{p3})
کنترل کننده K_{p4} و K_{i4}

با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده دوم مبدل VSC_2 (K_{p4} و K_{i4}) بر دیگر اجزای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل (۱۹) نشان داده شده است. با افزایش پارامترهای K_{p4} و K_{i4} ، مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ به سمت راست صفحه مختلط جابجا شده و بالتبع میرایی آنها با کاهش نامحسوسی مواجه می‌شوند در مقابل، مدهای نوسانی $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ و $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ می‌شوند در مقابل، مدهای نوسانی $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ و $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ به سمت چپ صفحه مختلط جابجا می‌شوند و میرایی آنها دستخوش افزایش می‌شود. نرخ افزایش میرایی مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ بیش از سایر مدها بود و به علاوه، میرایی مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ به ازای مقادیر پایینتر از مقدار ۱ برای پارامتر $factor$ دچار ناپایداری می‌شوند.



شکل (۱۹): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i4} و K_{p4})

شکل (۲۰) نمودار توان خروجی مبدل VSC_1 را در صورت بروز اتصال کوتاه در سمت سیستم AC_2 به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده نشان می‌دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰.۳ ایجاد و پس از ۴۰۰ میلی ثانیه رفع شده است. انتظار می‌رود با توجه به وابستگی جریان و ولتاژ سمت سیستم AC_1 و بالتبع توان آن (P_{AC1}) به مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ ، با افزایش مقدار ضرایب کنترل کننده مزبور میزان میرایی کاهش یابد.



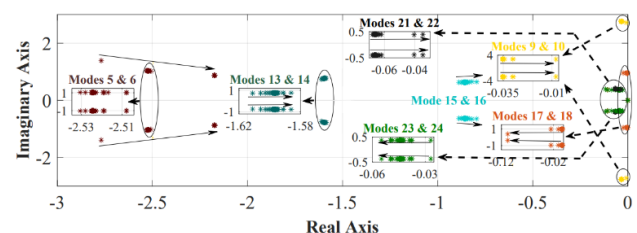
شکل (۱۶): نمودار جریان I_1 و توان انتقالی P_{AC1} در صورت بروز اتصال کوتاه در سیستم AC_1 به ازای مقادیر متنوع کنترل کننده (K_{i2} و K_{p2})

۳-۱-۲- کنترل کننده‌های مبدل VSC_2

کنترل کننده جریان برداری مبدل VSC_2 نیز همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود دارای دو کنترل کننده PI است که تغییر پارامترهای تک تک این کنترل کننده‌ها می‌تواند بر رفتار مدهای سیستم تاثیر گذار باشد.

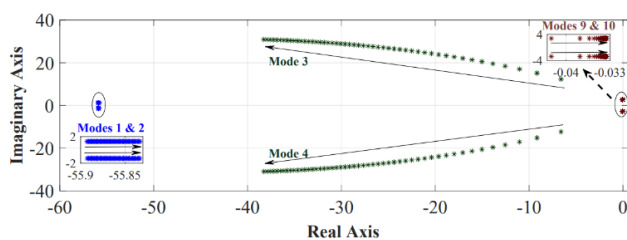
کنترل کننده K_{p3} و K_{i3}

با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده (K_{i3} و K_{p3}) بر دیگر اجزای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با افزایش پارامتر $factor$ ، مدهای نوسانی $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ و $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و با کاهش میرایی مواجه می‌شوند و متقابلاً مدهای نوسانی $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ نیز به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها اندکی افزایش می‌یابد. نرخ تغییر میرایی مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ بیش از سایر مدها است.



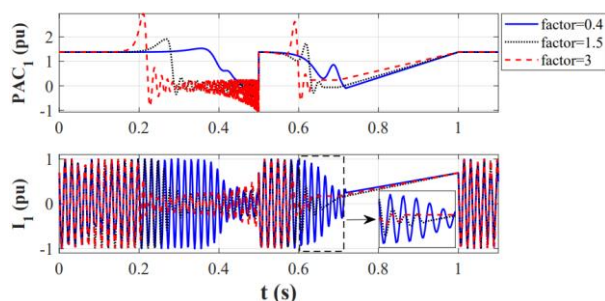
شکل (۱۷): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{i3} و K_{p3})

شکل (۱۸) نمودار توان خروجی مبدل VSC_3 را در صورت بروز اتصال کوتاه در سمت سیستم AC_2 به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده نشان می‌دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰.۳ ایجاد و پس از ۴۰۰ میلی ثانیه رفع شده است. انتظار می‌رود با توجه به وابستگی پارامتر توان خروجی مبدل VSC_3 (P_{WHVDC}) به مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ ، با افزایش مقدار ضرایب کنترل کننده مزبور میزان میرایی افزایش یابد که این موضوع در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل (۲۲): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{p11} و K_{i11})

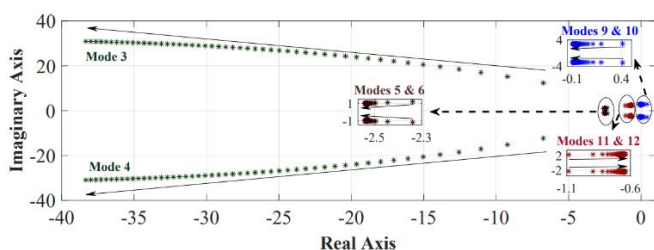
شکل (۲۳) نمودار توان خروجی مبدل VSC_1 را در صورت بروز اتصال کوتاه در سیستم AC_1 به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده نشان می‌دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰٫۳ ایجاد و پس از ۴۰۰ میلی‌ثانیه رفع شده است. انتظار می‌رود با توجه به وابستگی پارامتر توان خروجی مبدل VSC_1 و همچنین جریان I_1 به مدهای (λ_1, λ_2) و (λ_3, λ_4) انتظار می‌رود که با افزایش مقدار ضرایب کنترل کننده مزبور میزان میرایی افزایش یابد که این موضوع در شکل زیر قابل مشاهده است.



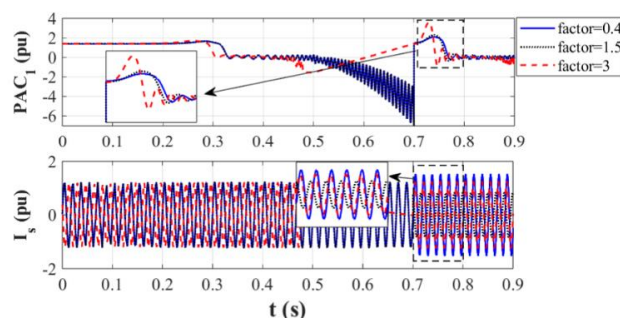
شکل (۲۳): نمودار فرکانس زاویه‌ای مبدل LCC را در صورت بروز اتصال کوتاه به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده (K_{p11} و K_{i11})

حلقه قفل شده فاز مبدل VSC_2 (PLL_2)

تاثیر تغییر گین کنترل کننده‌های PLL_2 در شکل (۲۴) نشان داده شده است. افزایش پارامترهای کنترل کننده فوق منجر به جابجایی مدهای نوسانی (λ_5, λ_6) و (λ_7, λ_8) به سمت چپ صفحه مختلط شده که بالتبع با افزایش میرایی مدها همراه خواهد بود. نرخ افزایش میرایی مدهای (λ_5, λ_6) بیش از سایر مدها است و به ازای ضرایب پایین این کنترل کننده، میزان میرایی مذکور منفی می‌شود. مدهای نوسانی (λ_7, λ_8) و $(\lambda_9, \lambda_{10})$ نیز به سمت راست صفحه مختلط جابجا شده که این موضوع با کاهش نامحسوس میرایی این مدها همراه است.



شکل (۲۴): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{p12} و K_{i12})

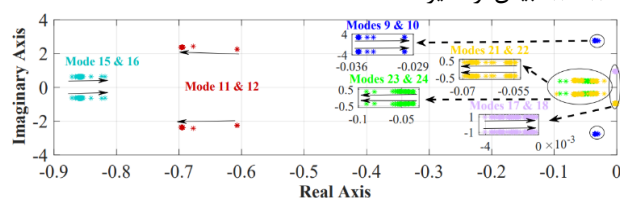


شکل (۲۰): نمودار توان خروجی مبدل VSC_1 (P_{AC1}) و جریان استاتور ژنراتور معادل مزرعه بادی (I_s) در صورت بروز اتصال کوتاه به ازای مقادیر مختلف کنترل کننده (K_{p4} و K_{i4})

۳-۱-۳ - کنترل کننده‌های مبدل VSC_3

کنترل کننده K_{pCC} و K_{iCC}

همانگونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، کنترل کننده PI مبدل VSC_3 (K_{iCC} , K_{pCC}) یک کنترل کننده تکمیلی به جهت اصلاح زاویه توان اکتیو است. با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده فوق بر دیگر اجزای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۲۱) نشان داده شده است. با افزایش مقادیر پارامترهای کنترل کننده فوق، مدهای (λ_1, λ_2) و (λ_3, λ_4) به سمت راست صفحه مختلط جابجا شده و بالتبع میرایی آنها با کاهش مواجه می‌شوند نرخ کاهش میرایی مدهای (λ_5, λ_6) قابل توجه است. در مقابل، مدهای نوسانی (λ_7, λ_8) و $(\lambda_9, \lambda_{10})$ به سمت چپ صفحه مختلط جابجا می‌شوند و میرایی آنها دستخوش افزایش می‌شود. در این حالت نیز نرخ افزایش میرایی مدهای $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ بیش از سایر مدهاست.



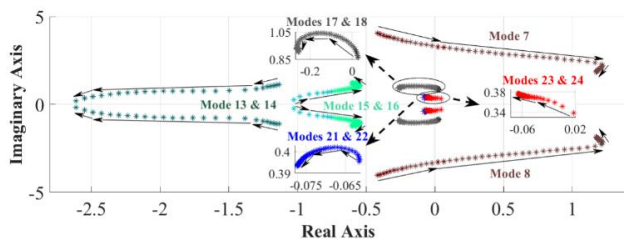
شکل (۲۱): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{iCC} و K_{pCC})

۳-۱-۴ - حلقه‌های قفل شده فاز مبدل‌ها (PLL_1 و PLL_2)

تاثیر تغییر کنترل کننده‌های PI موجود در PLL ها نیز در این بخش بررسی شده است.

حلقه قفل شده فاز مبدل LCC (PLL_1)

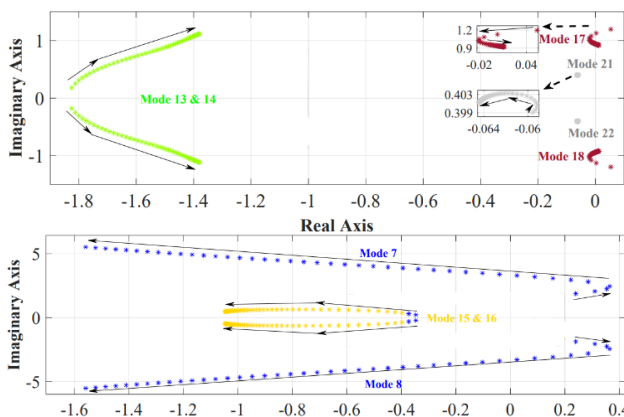
تاثیر تغییر گین کنترل کننده‌های PLL_1 در شکل (۲۲) نشان داده شده است. افزایش پارامترهای کنترل کننده فوق منجر به کاهش نامحسوس میرایی مدهای (λ_1, λ_2) و (λ_3, λ_4) و افزایش محسوس میرایی مدهای (λ_5, λ_6) می‌گردد.



شکل (۲۶): نحوه تغییر مدهای سیستم مورد مطالعه در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (Kp_{2DFIG} و Ki_{2DFIG})

کنترل کننده توان راکتیو

کنترل کننده توان راکتیو نیز با توجه به شکل (۹) دارای دو کنترل کننده PI می‌باشد. پارامترهای تناسبی و انتگرالی کنترل کننده‌های مذکور جهت مشاهده تاثیر آنها بر روی پایداری سیستم تغییر داده می‌شوند. با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده خارجی توان راکتیو (Kp_{3DFIG} و Ki_{3DFIG}) بر مدهای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل (۲۷) نشان داده شده است. مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) با حرکت از سمت راست صفحه مختلط به سمت چپ با افزایش میرایی همراه می‌شوند. در حالی که مدهای نوسانی ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$) با حرکت به سمت راست صفحه مختلط با کاهش نامحسوس میرایی و مدهای نوسانی ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$) با حرکت به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی مواجه می‌شوند. به علاوه، مدهای ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به ازای مقادیر بالای ضرایب کنترل کننده (Kp_{3DFIG} و Ki_{3DFIG}) ناپایدار می‌شوند.



شکل (۲۷): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (Kp_{3DFIG} و Ki_{3DFIG})

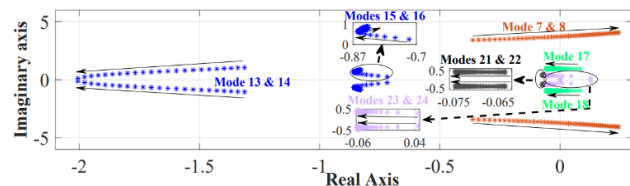
همچنین با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده دیگر توان راکتیو (Kp_{4DFIG} و Ki_{4DFIG}) نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مرتبط با نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۲۸) نشان داده شده است. در این حالت نیز، مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) با حرکت به سمت راست صفحه مختلط با کاهش قابل توجه میرایی مواجه شده و در صورت افزایش پارامتر $factor$ به بیش از ۲٫۶ برابر مقدار پایه، میزان میرایی منفی می‌گردد. با افزایش ضرایب کنترل کننده دیگر توان راکتیو (Kp_{4DFIG} و Ki_{4DFIG})، مدهای نوسانی ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$) و ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به سمت چپ صفحه مختلط حرکت می‌کنند. این در حالی است که مدهای

۳-۱-۵- کنترل کننده‌های مزرعه بادی

در ادامه با توجه به بازه تغییرات کاربردی پارامترهای کنترل کننده‌های توان اکتیو و راکتیو DFIG، اثر تغییر این پارامترها را بر میرایی سایر مدهای سیستم مورد مطالعه بدست می‌آوریم.

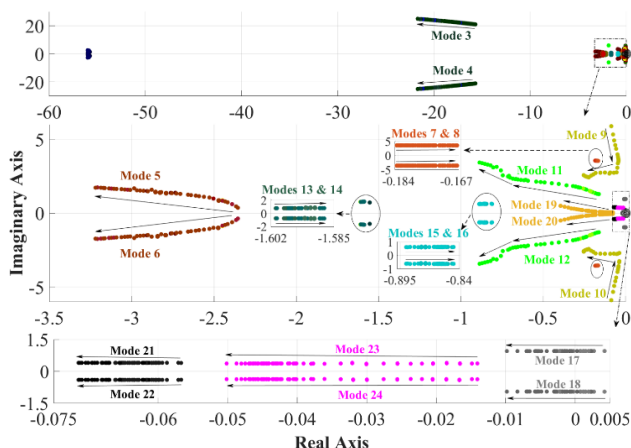
کنترل کننده توان اکتیو

همان‌گونه که شکل (۹) نشان می‌دهد، کنترل کننده توان اکتیو مبدل سمت روتور دارای دو کنترل کننده PI می‌باشد. در این قسمت پارامترهای تناسبی و انتگرالی کنترل کننده حلقه اول توان اکتیو (Kp_{1DFIG} و Ki_{1DFIG}) بر دیگر اجزای سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۲۵) نشان داده شده است. با افزایش پارامترهای این کنترل کننده، مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و بالتبع با کاهش میرایی و در مقادیر بالای ضرایب کنترل کننده ($factor > 2.2$) با میرایی منفی مواجه می‌شوند. مدهای نوسانی ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$) و ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$) و ($\lambda_{21}, \lambda_{22}$) با افزایش ضرایب کنترل کننده فوق، به سمت چپ صفحه مختلط رفته و بالتبع با افزایش میرایی همراه می‌شوند. میرایی مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به ازای مقادیر پایین ضرایب کنترل کننده فوق ($factor < 1$) منفی می‌شود. میرایی مدهای نوسانی ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$) نیز ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش نامحسوسی می‌یابد.



شکل (۲۵): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (Kp_{1DFIG} و Ki_{1DFIG})

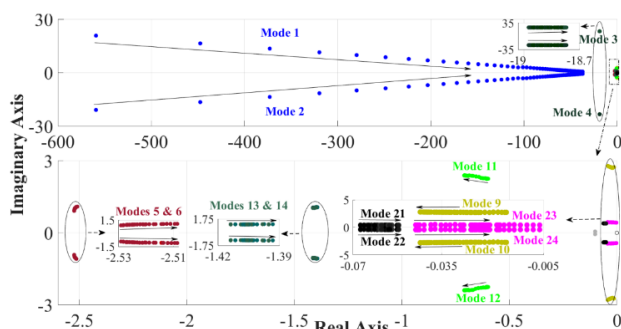
همچنین با تغییر پارامتر $factor$ اثر کنترل کننده دوم توان اکتیو (Kp_{2DFIG} و Ki_{2DFIG}) نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مرتبط با نحوه تغییر مدهای سیستم در شکل (۲۶) نشان داده شده است. در این مورد، با افزایش ضرایب کنترل کننده، مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به سمت راست صفحه مختلط جابجا شده و با کاهش میرایی همراه خواهند شد؛ به گونه‌ای که میرایی مدهای فوق با افزایش پارامتر $factor$ از مقدار ۱٫۲ منفی خواهد شد. مدهای نوسانی ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$) و ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$) و ($\lambda_{21}, \lambda_{22}$) و ($\lambda_{23}, \lambda_{24}$) با حرکت به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی مواجه می‌شوند. مدهای نوسانی ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$) به ازای مقادیر پایین ضرایب کنترل کننده فوق ($factor < 0.8$) میرایی منفی خواهند داشت.



شکل (۲۹): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس سیستم AC1
(R_E, X_{LE})

۳-۲-۲- امیدانس ترانسفورماتور (R_{t1}, X_{t1})

تاثیر امپدانس ترانسفورماتور (R_{t1} , X_{t1}) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و تغییر مدهای سیستم در شکل (۳۰) نشان داده شده است. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}\lambda_{12}\lambda)$ ، $(\lambda_{21}\lambda_{22}\lambda)$ ، $(\lambda_{31}\lambda_{32}\lambda)$ ، $(\lambda_{41}\lambda_{42}\lambda)$ ، $(\lambda_{51}\lambda_{52}\lambda)$ و $(\lambda_{61}\lambda_{62}\lambda)$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت می‌کنند و متعاقباً با کاهش نامحسوس در میرایی مواجه می‌شوند. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}\lambda_{12}\lambda)$ و $(\lambda_{21}\lambda_{22}\lambda)$ نیز با جابجایی به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی مواجه می‌شوند.

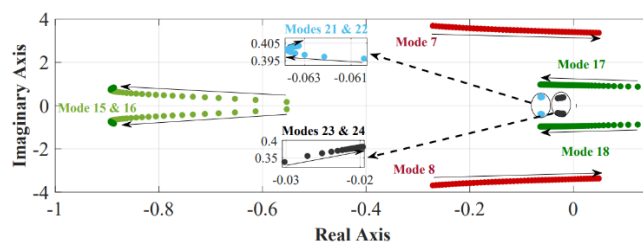


شکل (۳۰): تغییر مدهای سیستم با افزایش امیدانسی ترانسفورماتور
(R_{t1} , X_{t1})

۳-۲-۳- امیدانسی، خط انتقال HVDC (R_{HVDC} , X_{HVDC})

تأثیر امیددانس خط انتقال HVDC (R_{HVDC} , X_{HVDC}) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و تغییر مدهای سیستم در شکل (۳۱) نشان داده شده است. با افزایش پارامتر $factor1$ ، مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) و (λ_3, λ_4) با حرکت به سمت راست صفحه مختلط با کاهش نامحسوس میرایی همراه می‌شوند. نرخ کاهش میرایی مدهای (λ_5, λ_6) قابل توجه است. در مقابل، مدهای نوسانی (λ_7, λ_8) و $(\lambda_9, \lambda_{10})$ به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی مدها افزایش می‌یابد. در این مورد، میرایی مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ به ازای مقادیر پایین R_{HVDC} و X_{HVDC} منفی، می‌شود ($factor1 < 1$). به علاوه، زمان، که امیددانس

نوسانی $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ به ازای مقادیر پایین ضرایب کنترل کننده فوق، ناپایدار است.



شکل (۲۸): تغییر مدهای سیستم در صورت تغییر ضرایب کنترل کننده (K_{p4DFIG} و K_{i4DFIG})

۳-۲- اثر پارامترهای شبکه و توربین بادی بر میرایی

مدهای سیستم

در این بخش، اثر پارامترهای سیستم و توربین بادی بر میرایی مدهای سیستم بررسی شده است. بدین منظور، برای مقادیر مختلف پارامترهای شبکه و توربین بادی، میرایی مدها تعیین شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده به صورت زیر تغییر داده می‌شوند:

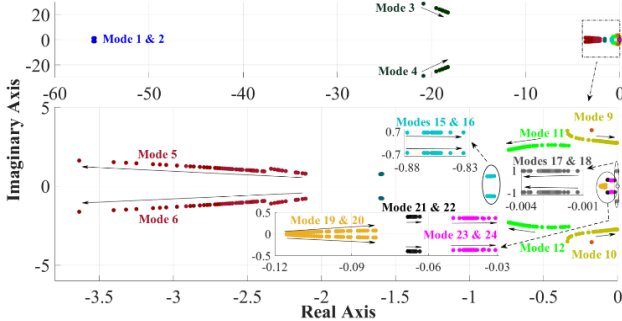
$$Parameter_{new} = Parameter_{base} \times factor1 \quad (\lambda)$$

پارامتر $factor1$ به صورت خطی باز ۰,۱ برابر مقدار پایه تا ۱,۵ برابر مقدار پایه تغییر داده شده است ($0.1 < factor1 < 1.5$)
برای مقادیر مختلف پارامترهای سیستم، تغییر در مدهای نوسانی تعیین و نتایج در ادامه ارائه شده است.

۳-۲-۱- امیدانس سیستم (R_E, X_{LE}) AC1

تأثیر امیدانس سیستم AC1 (R_E , X_{LE}) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۲۹) ارائه شده است. مد نوسانی (۱،۲) به ازای مقادیر مختلف امیدانس سیستم AC1 تقریباً پایدار است. با افزایش پارامتر $factor1$ ، مدهای نوسانی ($\lambda_{۳۱}$ ، $\lambda_{۴۱}$)، ($\lambda_{۵۱}$ ، $\lambda_{۶۱}$)، ($\lambda_{۹۱}$ ، $\lambda_{۱۰۱}$)، ($\lambda_{۱۱۱}$ ، $\lambda_{۱۲۱}$)، ($\lambda_{۱۷۱}$ ، $\lambda_{۱۸۱}$)، ($\lambda_{۱۹۱}$ ، $\lambda_{۲۰۱}$) و ($\lambda_{۲۳۱}$ ، $\lambda_{۲۴۱}$) با حرکت به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی مواجه می‌شوند. این در حالی است که تغییر میرایی مدهای ($\lambda_{۱۷۱}$ ، $\lambda_{۱۸۱}$) و ($\lambda_{۱۹۱}$ ، $\lambda_{۲۰۱}$) نسبت به سایر مدها بیشتر است. زمانی که امیدانس سیستم AC1 (R_E , X_{LE}) کمتر از ۰.۷۵ مقدار پایه است ($factor1 < 0.75$) میرایی مدهای ($\lambda_{۱۷۱}$ ، $\lambda_{۱۸۱}$) منفی می‌شود. مدهای نوسانی ($\lambda_{۷۱}$ ، $\lambda_{۸۱}$) و ($\lambda_{۱۵۱}$ ، $\lambda_{۱۶۱}$) نیز با حرکت به سمت راست صفحه مختلط با کاهش نامحسوس میرایی مواجه می‌شوند.

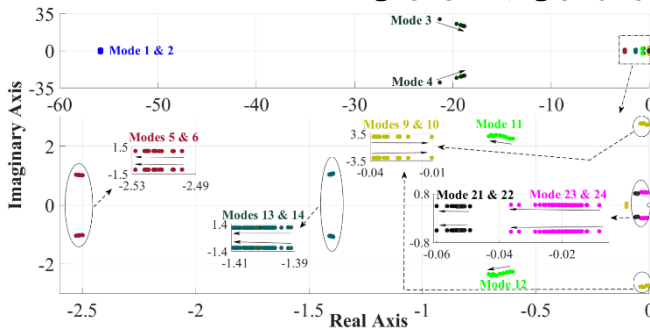
مواجه می‌شوند. این در حالی است که مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ ، $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ ، $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ ، $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها با کاهش نامحسوسی مواجه می‌شود. مدهای نوسانی $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ ، $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ و $(\lambda_{25}, \lambda_{26})$ با جابجا شدن به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی مواجه می‌شوند.



شکل (۳۳): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس سیستم AC2 (R_B, X_{LB})

۳-۲-۶- امپدانس استاتور DFIG (R_s DFIG, X_s DFIG)

تاثیر امپدانس استاتور DFIG (R_s DFIG, X_s DFIG) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۳۴) ارائه شده است. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ با حرکت به سمت راست صفحه مختلط با کاهش میرایی مواجه می‌شوند. نرخ کاهش میرایی مدهای $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ قابل توجه است. مدهای نوسانی $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ ، $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ و $(\lambda_{25}, \lambda_{26})$ به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها با افزایش می‌یابد.

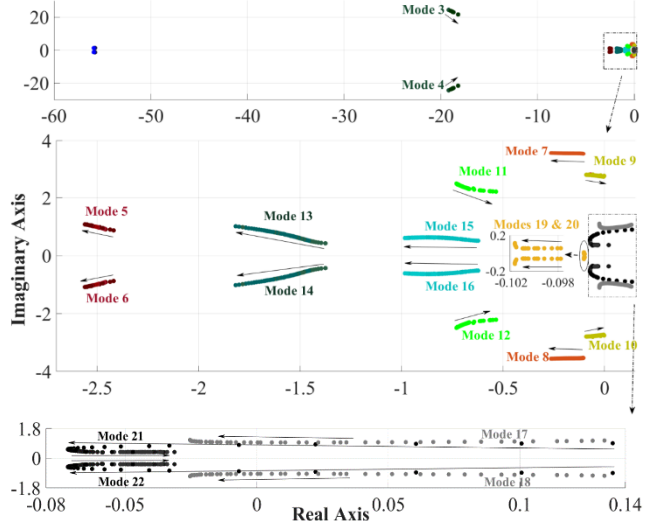


شکل (۳۴): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس استاتور DFIG (R_s DFIG, X_s DFIG)

۳-۲-۷- امپدانس روتور DFIG (R_r DFIG, X_r DFIG)

تاثیر امپدانس روتور DFIG (R_r DFIG, X_r DFIG) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۳۵) ارائه شده است. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ ، $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ ، $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ ، $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها کاهش می‌یابد. نرخ کاهش میرایی مدهای $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ قابل ملاحظه است. این در حالی است که مدهای نوسانی $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ با جابجایی به سمت چپ صفحه مختلط با افزایش میرایی همراه می‌شوند.

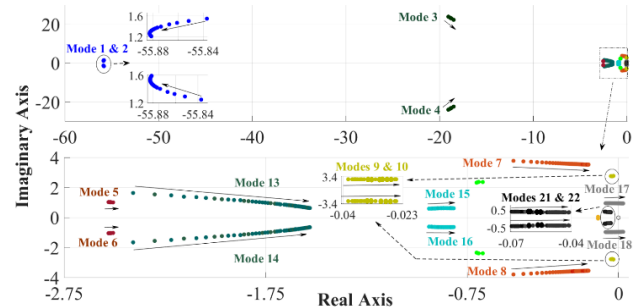
خط انتقال HVDC (R_{HVDC}, X_{HVDC}) کمتر از ۰.۴ برابر مقدار پایه است ($factor1 < 0.4$) میرایی مدهای $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ نیز منفی است.



شکل (۳۵): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس خط انتقال HVDC (R_{HVDC}, X_{HVDC})

۳-۲-۴- امپدانس ترانسفورماتور (R_t , X_t)

تاثیر امپدانس ترانسفورماتور (R_t , X_t) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و تغییر مدهای سیستم در شکل (۳۶) نشان داده شده است. مد نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ به ازای مقادیر مختلف امپدانس ترانسفورماتور (R_t , X_t) تقریباً پایدار است. با افزایش پارامتر $factor1$ ، مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ ، $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ ، $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ ، $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و کاهش نامحسوس میرایی را تجربه می‌کنند. نرخ کاهش میرایی مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ نسبت به سایر مدها بیشتر بوده و به علاوه، میرایی مدهای $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ به ازای مقادیر بزرگتر از ۱ برای پارامتر $factor1$ ناپایدار می‌شوند ($factor1 > 1$).

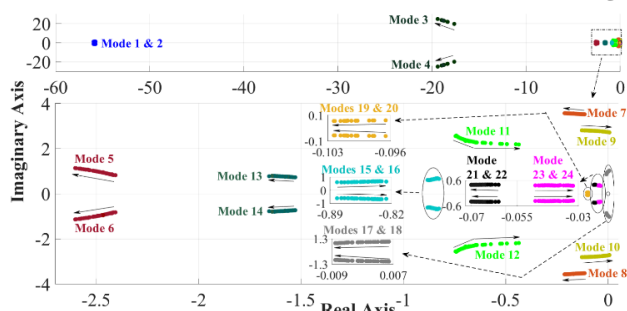


شکل (۳۶): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس ترانسفورماتور (R_t, X_t)

۳-۲-۵- امپدانس سیستم AC2 (R_B, X_{LB})

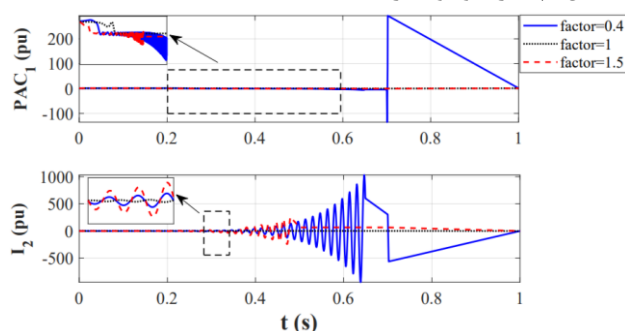
تاثیر امپدانس سیستم AC2 (R_B, X_{LB}) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۳۳) ارائه شده است. با افزایش پارامتر $factor1$ ، مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ به سمت راست صفحه مختلط حرکت کرده و بالتبع با کاهش قابل توجهی در میرایی

صفحه مختلط کاهش می‌یابد. میرایی مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) با افزایش امپدانس مزرعه بادی کاهش یافته و در مقادیر بالا، ناپایدار می‌گردد.



شکل (۳۷): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w)

شکل (۳۸) نمودار توان خروجی مبدل VSC_1 (PAC_1) و جریان I_2 را در صورت بروز اتصال کوتاه در نزدیکی مزرعه بادی به ازای مقادیر مختلف مقاومت و راکتانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w) نشان می‌دهد. اتصال کوتاه در ثانیه ۰٫۳ ایجاد و پس از ۴۰۰ میلی ثانیه رفع شده است. با توجه به وابستگی ولتاژها و جریانهای شبکه به مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) و (λ_3, λ_4) می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت پایدار برای عملکرد شبکه در حالتی رخ می‌دهد که پارامترهای شبکه حوالی مقدار پایه در نظر گرفته شده باشند و با دور شدن از مقدار فوق، احتمال ناپایداری وجود دارد.

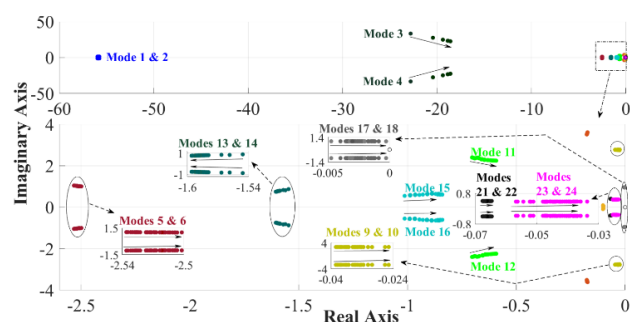


شکل (۳۸): نمودار توان سیستم AC_1 (PAC_1) و جریان I_2 در صورت بروز اتصال کوتاه به ازای مقادیر مختلف امپدانس معادل مزرعه بادی

$(X_w$ و $R_w)$

۳-۳- بررسی تداخل کنترل کننده‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای سیستم

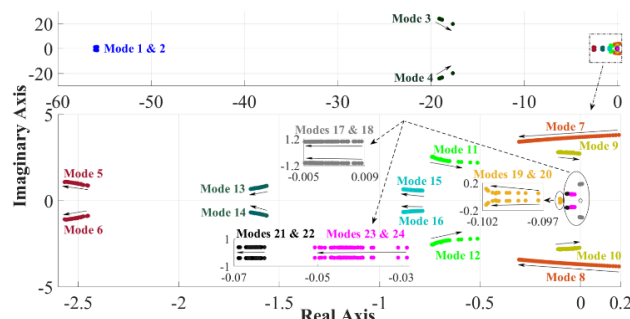
در بخش ۳-۱، تأثیر کنترل کننده‌های سیستم و در بخش ۳-۲، تأثیر سایر پارامترهای سیستم بر میرایی مدها مورد بررسی قرار گرفت. سؤال اصلی این است که آیا تأثیر کنترل کننده‌ها بر میرایی سیستم به مقادیر پارامترهای غیرقابل کنترل سیستم بستگی دارد یا خیر؟ برای پاسخ به این سؤال، لازم است میرایی مدهای سیستم در شرایطی که پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل همزمان تغییر می‌کنند، محاسبه شود. با توجه به تعداد زیاد کنترل کننده‌ها و پارامترهای غیرقابل کنترل، بررسی تمام تأثیرات آن‌ها در این مقاله امکان‌پذیر نیست. به همین



شکل (۳۵): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس روتور $DFIG$ (R_r ، X_r ، $DFIG$)

۳-۲-۸- امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی (R_t, X_t)

تأثیر امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی (R_t, X_t) (بین مزرعه بادی و شبکه بالادست بادی) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۳۶) ارائه شده است. میرایی مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) ، (λ_3, λ_4) ، (λ_5, λ_6) و (λ_7, λ_8) با حرکت به سمت راست صفحه مختلط کاهش می‌یابد. در این بین، مدهای نوسانی $(\lambda_9, \lambda_{10})$ میرایی بسیار کمی در مقادیر بالای امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی (R_t, X_t) دارند. مدهای نوسانی $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ ، $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ ، $(\lambda_{15}, \lambda_{16})$ ، $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ ، $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ ، $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ و $(\lambda_{23}, \lambda_{24})$ به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها افزایش می‌یابد. زمانی که امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی کمتر از ۰٫۷۵ برابر مقدار پایه است ($factor1 < 0.75$) میرایی مدهای نوسانی $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ منفی می‌شود.



شکل (۳۶): تغییر مدهای سیستم با افزایش امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی (R_t, X_t)

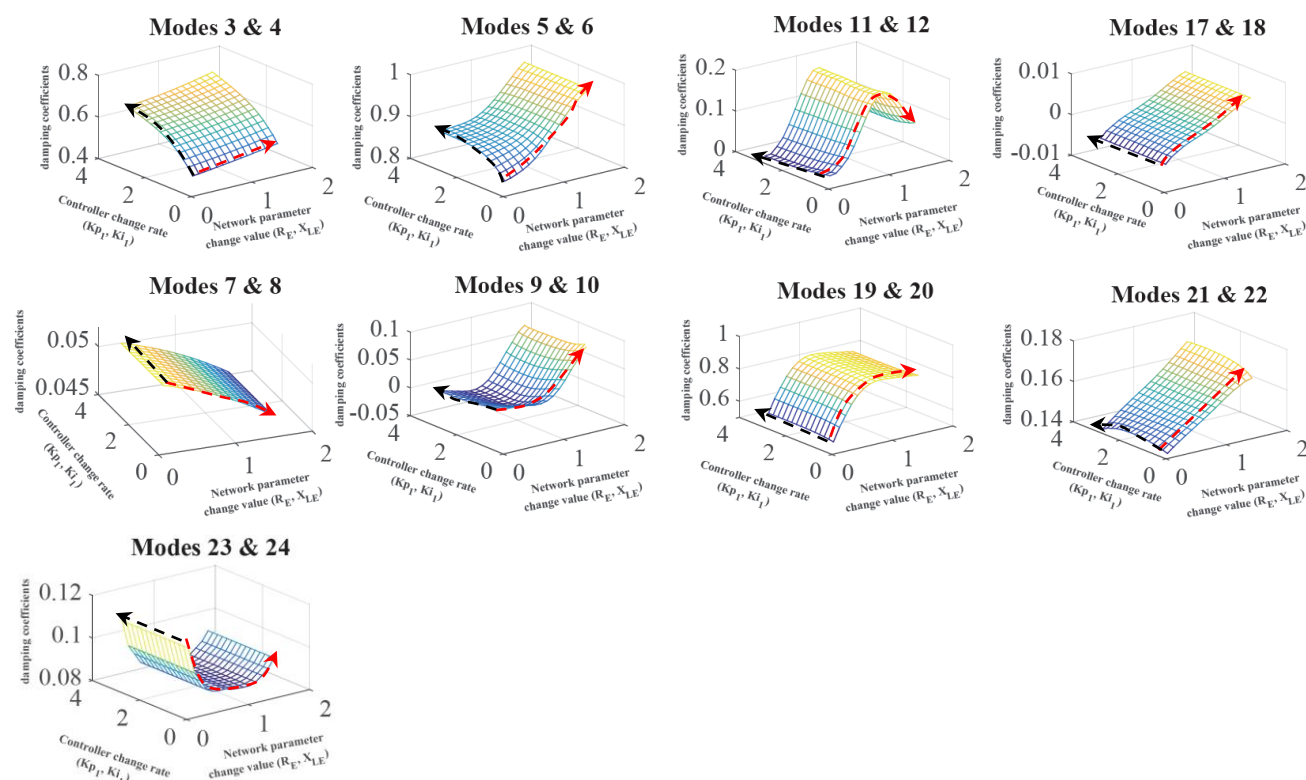
۳-۲-۹- امپدانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w)

تأثیر امپدانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w) بر سایر اجزای سیستم با تغییر پارامتر $factor1$ بررسی و نتایج در شکل (۳۷) ارائه شده است. مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) ، (λ_3, λ_4) ، (λ_5, λ_6) ، (λ_7, λ_8) ، $(\lambda_{13}, \lambda_{14})$ ، $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ به سمت چپ صفحه مختلط حرکت کرده و میرایی آنها افزایش می‌یابد. میرایی مدهای $(\lambda_9, \lambda_{10})$ با حرکت به سمت چپ صفحه مختلط کاهش ناچیزی را نشان می‌دهند. زمانی که امپدانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w) کمتر از یک برابر مقدار پایه است ($factor1 < 1$) میرایی مدهای $(\lambda_{17}, \lambda_{18})$ و $(\lambda_{19}, \lambda_{20})$ منفی می‌شود. مدهای نوسانی (λ_1, λ_2) ، (λ_3, λ_4) ، $(\lambda_{11}, \lambda_{12})$ و $(\lambda_{21}, \lambda_{22})$ با حرکت به سمت راست

(K_{p1}, K_{i1}) VSC_1 تأثیر کنترل کننده مبدل AC_1 (R_E, X_{LE})، روی میرایی مدها تقریباً یکسان است. برای مثال، با افزایش بهره کنترل کننده VSC_1 (K_{p1}, K_{i1}) برای مقادیر مختلف امپدانس سیستم AC_1 (R_E, X_{LE})، میرایی مدهای نوسانی ($\gamma_{\lambda, \mu}$) افزایش می‌یابد.

دلیل، تنها نتایج مربوط به تأثیر یک پارامتر غیرقابل کنترل بر یک کنترل کننده بررسی شده است.

پارامترهای امپدانس سیستم AC_1 (R_E, X_{LE}) به عنوان پارامترهای غیرقابل کنترل و کنترل کننده VSC_1 (K_{p1}, K_{i1}) که نزدیک به سیستم AC_1 است به عنوان کنترل کننده مورد بررسی قرار می‌گیرند. فرآیند بررسی میرایی مدهای سیستم با تغییر همزمان امپدانس سیستم AC_1 (R_E, X_{LE}) و بهره‌های کنترل کننده VSC_1 (K_{p1}, K_{i1}) در شکل (۳۹) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳۹) مشاهده می‌شود، برای مقادیر مختلف امپدانس سیستم



شکل (۳۹): تغییر روند میرایی مدهای سیستم با تغییر همزمان امپدانس سیستم AC_1 (R_E, X_{LE}) و بهره‌های کنترل کننده VSC_1 (K_{p1}, K_{i1})

۴- انتخاب بازه مناسب برای پارامترهای کنترل کننده‌ها به منظور ایجاد پایداری بیشینه

برای سیستم

بدین منظور، با تغییر ضرایب کنترل کننده مد نظر، حداقل و حداکثر میرایی برای هر مد و در شرایط مختلف پارامترهای سیستم تعیین می‌شود. شکل (۴۰) فلوچارت دستیابی به محدوده بهینه ضرایب کنترل کننده‌های سیستم و جدول (۲) خلاصه نتایج را نشان می‌دهند.

نتایج به دست آمده از بخش‌های قبلی نشان می‌دهد که به ازای برخی از ضرایب کنترل کننده‌های مورد استفاده، سیستم ممکن است ناپایدار باشد و یا میرایی مناسبی نداشته باشد. بنابراین، طراحی مناسب کنترل کننده‌ها و تعیین محدوده مناسب برای ضرایب آن‌ها جهت دستیابی به حداکثر پایداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور، در این بخش محدوده مناسب برای انتخاب ضرایب هر کنترل کننده در سیستم مورد بررسی تعیین می‌شود.

جدول (۲): بازه مناسب ضرایب کنترل کننده‌های سیستم مورد مطالعه

بازه مناسب ضرایب کنترل کننده		توضیحات	ضرایب کنترل کننده
K_i	K_p		
32.4~46.5	7.82~11.22	کنترل کننده جریان مبدل VSC_1	K_{p1}, K_{i1}
95.0~112.6	18.36~21.76		K_{p2}, K_{i2}
179.5~214.7	17.34~20.74		K_{p3}, K_{i3}
158.4~193.6	15.3~18.7	کنترل کننده جریان مبدل VSC_2	K_{p4}, K_{i4}
0.13~0.17	0.064~0.084	کنترل کننده تکمیلی مبدل VSC_3	K_{pCC}, K_{iCC}
47~67	0.94~1.34	سمت مبدل PLL_1	K_{ppl1}, K_{ipl1}
24~32	96~128	سمت مبدل PLL_2	K_{ppl2}, K_{ipl2}
3.5~4.1	0.12~0.14	کنترل کننده‌های ژنراتور DFIG	$(K_{p1}, K_{i1})_{DFIG}$
2~2.3	0.07~0.09		$(K_{p2}, K_{i2})_{DFIG}$
13~17	0.07~0.09		$(K_{p3}, K_{i3})_{DFIG}$
3~3.6	0.06~0.08		$(K_{p4}, K_{i4})_{DFIG}$

سیستم قدرت است. در این مطالعه، از تحلیل مودال خطی برای بررسی اثر تداخل حلقه‌های کنترل کننده در سیستم انتقال VSC-MTDC استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برخی از کنترل کننده‌ها تاثیر قابل توجهی بر پایداری سیستم دارند و انتخاب نادرست بهره‌ها می‌تواند باعث کاهش میرایی و در بدترین حالت، منجر به ناپایداری سیستم شود. به‌ویژه، کنترل کننده جریان برداری مبدل‌های VSC و کنترل کننده‌های توان اکتیو و راکتیو ژنراتور DFIG تأثیر بیشتری بر میرایی مدهای سیستم داشته و در برخی شرایط می‌توانند منجر به ناپایداری شوند. بنابراین، دقت در طراحی این کنترل کننده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر دقت در طراحی کنترل کننده‌ها، تغییرات پارامترهای غیرقابل کنترل سیستم نیز باید مورد توجه قرار گیرد؛ چرا که با گذر زمان و گسترش شبکه، برخی از پارامترهای غیرقابل کنترل ممکن است تغییر کنند و این موضوع می‌تواند شرایط را برای ناپایداری سیستم فراهم کند.

از بین پارامترهای غیرقابل کنترل، امپدانس ترانسفورماتور مزرعه بادی (R_t, X_t)، امپدانس معادل مزرعه بادی (R_w, X_w)، امپدانس خطوط AC و امپدانس خط انتقال HVDC بیشترین تأثیر را بر میرایی سیستم دارند و سیستم می‌تواند برای برخی از مقادیر این پارامترها ناپایدار شود.

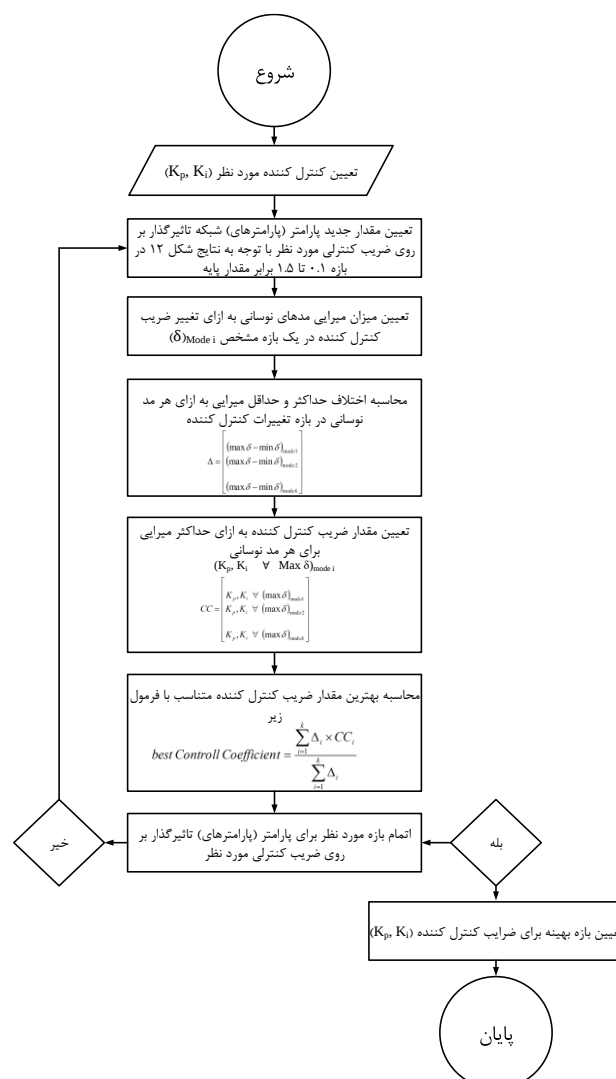
در پایان مقاله برای اطمینان از پایداری سیستم، محدوده‌های مناسبی برای انتخاب پارامترهای کنترل کننده‌ها تعیین شده است.

ضمایم

- الف- مشخصات سیستم مورد مطالعه

جدول (الف-۱): مشخصات سیستم مورد مطالعه (شکل (۱۱))

پارامتر	مقدار (pu)	پارامتر	مقدار (pu)
R_E	0.035	Kp_2	8.5
L_E	0.332	Ki_2	44
C_{f1}	0.96	Kp_3	8.5
R_{t1}	0.008	Ki_3	88
L_{t1}	0.152	Kp_4	8.5
$R_{H1}, R_{H2}, R_{H3}, R_{H4}$	0.0127	Ki_4	88
$L_{H1}, L_{H2}, L_{H3}, L_{H4}$	0.452	Kp_5	1
C_1, C_2, C_3, C_4	18.85	Ki_5	51



شکل (۴۰): فلوجارت تعیین مقدار بهینه ضرایب کنترل کننده

۵- نتیجه گیری

عملکرد پایدار سیستم انتقال VSC-MTDC نیازمند بررسی دقیق بروز تداخل بین تمامی مبدل‌ها و کنترل کننده‌ها و همچنین سایر اجزای

Ki_{1DFIG}	بخش روتور (RSC)	5
KP_{2DFIG}		0.3
Ki_{2DFIG}		8
KP_{3DFIG}		0.05
Ki_{3DFIG}	پارامترهای کنترل کننده توان راکتیو مربوط به	5
KP_{4DFIG}	مبدل بخش روتور (RSC)	003
Ki_{4DFIG}		8

R_{l2}	0.01	K_{ppll1}	1
L_{l2}	0.15	K_{jpll1}	50
C_{f2}	0.15	K_{ppll2}	80
R_B	0.035	K_{jpll2}	20
L_B	0.332	K_{wd}	6
R_{HW}	0.03	T_{wd}	0.2 s
L_{HW}	0.094	T_{mw}	0.2 s
C_{HW}	5	K_w	1.5
R_t	0.075	T_m	10 ms
L_t	0.12	Kp	0.08
Kp_i	8.5	Ki	0.15
Ki_1	35.2		

جدول (الف-۲): مشخصات ژنراتور DFIG و کنترل کننده‌های مبدل

سمت روتور (RSC) (شکل (۱۱))

جدول (الف-۳): مشخصات توربین بادی در سیستم مورد مطالعه (شکل (۱۱))

پارامتر	توصیف	مقدار
H_{blade}	ثابت اینرسی پره‌ها	4.5 s
H_{hub}	ثابت اینرسی بخش مرکزی	0.5 s
K_{bh}	ضریب سختی محور بین پره‌ها و بخش مرکزی	0.2 P.U.
K_{hg}	ضریب سختی محور بین بخش مرکزی توربین و ژنراتور	1.6 P.U.
D_{bh}	ضریب میرایی محور بین پره‌ها و بخش مرکزی	1.6 P.U.
D_{hg}	ضریب میرایی محور بین بخش مرکزی توربین و ژنراتور	1.5 P.U.
N_{gear}	نسبت تبدیل جعبه دنده	91

مقدار	توصیف	پارامتر
0.023 P.U.	مقاومت استاتور	R_s
0.016 P.U.	مقاومت روتور	R_r
0.18 P.U.	اندوکتانس پراکندگی استاتور	L_{ls}
0.16 P.U.	اندوکتانس پراکندگی روتور	L_{lr}
2.9 P.U.	اندوکتانس مغناطیس کنندگی	L_m
0.54 s	ثابت اینرسی ژنراتور	H_g
3	جفت قطب	P
575 V	ولتاژ نامی ماشین	V_n
1.5 MW	توان نامی ماشین	P_n
0.05	پارامترهای کنترل کننده توان اکتیو مربوط به مبدل	KP_{1DFIG}

• ب- معادلات تحلیل مدال

مدل سیستم AC1

$$\begin{aligned}\frac{di_{Ed}}{dt} &= \frac{1}{L_E} (V_{Ed} - R_E i_{Ed} - V_{pcc1d} + \omega_1 L_E i_{Eq}) \\ \frac{di_{Eq}}{dt} &= \frac{1}{L_E} (V_{Eq} - R_E i_{Eq} - V_{pcc1q} - \omega_1 L_E i_{Ed}) \\ V_{Ed} &= V_{m1} \cos(\theta_1 - (\omega_0 t + \alpha_0)) \\ V_{Eq} &= V_{m1} \sin((\omega_0 t + \alpha_0) - \theta_1) \\ \frac{dV_{pcc1d}}{dt} &= \frac{1}{c_{f1}} (i_{Ed} - i_{1d} + \omega_1 c_{f1} V_{pcc1q}) \\ \frac{dV_{pcc1q}}{dt} &= \frac{1}{c_{f1}} (i_{Eq} - i_{1q} - \omega_1 c_{f1} V_{pcc1d}) \\ \frac{di_{1d}}{dt} &= \frac{1}{L_{t1}} (v_{pcc1d} - R_{t1} i_{1d} - V_{Eshd} + \omega_1 L_{t1} i_{1q}) \\ \frac{di_{1q}}{dt} &= \frac{1}{L_{t1}} (v_{pcc1q} - R_{t1} i_{1q} - V_{Eshq} - \omega_1 L_{t1} i_{1d})\end{aligned}$$

مدل خط انتقال HVDC

$$\begin{aligned}\frac{dV_{dc1}}{dt} &= \left(\frac{V_{Eshd} i_{1d} + V_{Eshq} i_{1q}}{c_1 V_{dc1}} \right) - \frac{i_{H1}}{c_1} \\ \frac{di_{H1}}{dt} &= \frac{1}{L_{H1}} (V_{dc1} - V_{dc2} - R_{H1} i_{H1}) \\ \frac{dV_{dc2}}{dt} &= \frac{1}{c_2} (i_{H1} - i_{H2}) \\ \frac{di_{H2}}{dt} &= \frac{(L_{H3} + L_{HW})}{\alpha} (V_{dc2} - R_{H2} i_{H2} - R_{H2} i_{H3} - R_{H3} i_{HW} - V_{dc3}) \\ &\quad - \frac{L_{H3}}{\alpha} (V_{dcw} - R_{HW} i_{HW} - R_{H3} i_{H2} - R_{H3} i_{HW} - V_{dc3})\end{aligned}$$

$$\text{Alpha} = (L_{H2} + L_{H3})(L_{H3} + L_{HW}) - L_{H3}^2$$

$$\frac{dV_{dc3}}{dt} = \frac{1}{c_3}(i_{H3} - i_{H4})$$

$$\frac{di_{H4}}{dt} = \frac{1}{L_{H4}}(V_{dc3} - V_{dc4} - R_{H4}i_{H4})$$

$$\frac{dV_{dc4}}{dt} = \frac{i_{H4}}{c_4} - \left(\frac{V_{Bshd}i_{2d} + V_{Bshq}i_{2q}}{c_4V_{dc4}} \right)$$

مدل سیستم AC2

$$\frac{di_{2d}}{dt} = \frac{1}{L_{t2}}(V_{Bshd} - R_{t2}i_{2d} - V_{pcc2d} + \omega_2 L_{t2}i_{2q})$$

$$\frac{di_{2q}}{dt} = \frac{1}{L_{t2}}(V_{Bshq} - R_{t2}i_{2q} - V_{pcc2q} - \omega_2 L_{t2}i_{2d})$$

$$\frac{dV_{pcc2d}}{dt} = \frac{1}{c_{f2}}(i_{2d} - i_{Bd} + \omega_2 c_{f2}V_{pcc2q})$$

$$\frac{dV_{pcc2q}}{dt} = \frac{1}{c_{f2}}(i_{2q} - i_{Bq} - \omega_2 c_{f2}V_{pcc2d})$$

$$\frac{di_{Bd}}{dt} = \frac{1}{L_B}(V_{pcc2d} - R_B i_{Bd} - V_{Bd} + \omega_2 L_B i_{Bq})$$

$$\frac{di_{Bq}}{dt} = \frac{1}{L_B}(V_{pcc2q} - R_B i_{Bq} - V_{Bq} - \omega_2 L_B i_{Bd})$$

مدل PLLها

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = k_{ppll1}V_{pcc1q} + k_{ipll1}V_{pcc1q}$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = k_{ppll2}V_{pcc2q} + k_{ipll2}V_{pcc2q}$$

مدل سیستمهای کنترلی AC1 و AC2

$$\frac{dx_1}{dt} = i_{dref1} - i_{Ed}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = i_{qref1} - i_{Eq}$$

$$\frac{dx_3}{dt} = i_{dref2} - i_{Bd}$$

$$\frac{dx_4}{dt} = i_{qref2} - i_{Bq}$$

$$\frac{dx_5}{dt} = V_{dc4}^2 - V_{dcref}^2$$

مدل مزرعه بادی

$$\frac{di_{Wd}}{dt} = \frac{1}{L_W}(V_{Wd} - R_W i_{Wd} - V_{Wshd} + \omega_{gen} L_W i_{Wq})$$

$$\frac{di_{Wq}}{dt} = \frac{1}{L_W}(V_{Wq} - R_W i_{Wq} - V_{Wshq} - \omega_{gen} L_W i_{Wd})$$

$$\frac{dV_{dcw}}{dt} = \left(\frac{V_{Wshd}i_{Wd} + V_{Wshq}i_{Wq}}{C_W V_{dcw}} \right) - \frac{i_{HW}}{C_W}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{HW}}{dt} = & \frac{-L_{H3}}{Alpha} (V_{dc2} - R_{H2}i_{H2} - R_{H2}i_{H3} - R_{H3}i_{HW} - V_{dc3}) \\ & + \frac{(L_{H2} + L_{H3})}{Alpha} (V_{dcw} - R_{HW}i_{HW} - R_{H3}i_{H2} - R_{H3}i_{HW} - V_{dc3}) \end{aligned}$$

$$Alpha = (L_{H2} + L_{H3})(L_{H3} + L_{HW}) - L_{H3}^2$$

$$\frac{d\omega_{blade}}{dt} = \frac{1}{2H_{blade}} (T_m - K_{bh}(\delta_{blade} - \delta_{hub}) - D_{bh}(\omega_{blade} - \omega_{hub}) - D_b(\omega_{blade} - \omega_{ref}))$$

$$\frac{d\delta_{blade}}{dt} = \omega_s(\omega_{blade} - \omega_{ref})$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{hub}}{dt} = & \frac{1}{2H_{hub}} (-K_{bh}(\delta_{hub} - \delta_{blade}) - K_{hg}K_{gear}(K_{gear}\delta_{hub} - \delta_{gen}) - D_{hg}K_{gear}(K_{gear}\omega_{hub} - \omega_{gen}) \\ & - D_{bh}(\omega_{hub} - \omega_{blade}) - D_h(\omega_{hub} - \omega_{ref})) \end{aligned}$$

$$\frac{d\delta_{hub}}{dt} = \omega_s(\omega_{hub} - \omega_{ref})$$

$$\frac{d\omega_{blade}}{dt} = \frac{1}{2H_{gen}} (-T_e - K_{hg}(\delta_{gen} - K_{gear}\delta_{hub}) - D_{hg}(\omega_{gen} - K_{gear}\omega_{hub}) - D_g(\omega_{gen} - \omega_{ref}))$$

$$\frac{d\delta_{gen}}{dt} = \omega_s(\omega_{gen} - \omega_{ref})$$

$$\omega_{ref} = (1 - s)\omega_s$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = Beta. \left(\frac{\omega_b}{\dot{x}_s} \right) \left(V_{qs} - \frac{x_m}{x_r} V_{qr} - R_s i_{qs} + \frac{x_m}{T_o \omega_b} i_{qr} + \left(\frac{\omega_r - \omega}{\omega_b} \dot{x}_s - \frac{\omega_r}{\omega_b} x_s \right) i_{ds} - \frac{\omega_r x_m}{\omega_b} i_{dr} \right)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = Beta. \left(-\frac{\omega_b}{\dot{x}_s} \right) \left(-V_{ds} + \frac{x_m}{x_r} V_{dr} + R_s i_{ds} - \frac{x_m}{T_o \omega_b} i_{dr} + \left(\frac{\omega_r - \omega}{\omega_b} \dot{x}_s - \frac{\omega_r}{\omega_b} x_s \right) i_{qs} - \frac{\omega_r x_m}{\omega_b} i_{qr} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{qr}}{dt} = & Gama. \left(\frac{\omega_b}{x_m} \right) \left(\left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) V_{qs} - R_s \left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) i_{qs} - \left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) \left(\frac{\omega_r x_s}{\omega_b} \right) i_{ds} + \left(\frac{\omega_r x_s}{\omega_b \dot{x}_s} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) x_m i_{dr} - \frac{x_s x_m}{\dot{x}_s T_o \omega_b} i_{qr} \right. \\ & \left. + \frac{x_s x_m}{\dot{x}_s x_r} V_{qr} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{dr}}{dt} = & Gama. \left(\frac{\omega_b}{x_m} \right) \left(-\left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) V_{ds} + R_s \left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) i_{ds} - \left(\frac{\dot{x}_s - x_s}{\dot{x}_s} \right) \left(\frac{\omega_r x_s}{\omega_b} \right) i_{qs} + \left(\frac{\omega_r x_s}{\omega_b \dot{x}_s} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) x_m i_{qr} + \frac{x_s x_m}{\dot{x}_s T_o \omega_b} i_{dr} \right. \\ & \left. - \frac{x_s x_m}{\dot{x}_s x_r} V_{dr} \right) \end{aligned}$$

$$Beta = \left(1 + \left(\frac{x_{tr} + x_l}{\dot{x}_s} \right) (1 - S) \right)^{-1}$$

$$Gama = \left(1 - \left(\frac{(\dot{x}_s - x_s)(x_{tr} + x_l)}{x_m \dot{x}_s} \right) (1 - S) \right)^{-1}$$

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

$$\frac{dx_6}{dt} = K_{i6}(P_{ref} - P_{gen})$$

$$\frac{dx_7}{dt} = K_{i7}(K_{p6}(P_{ref} - P_{gen}) + x_6 - i_{qr})$$

$$\begin{aligned}\frac{dx_8}{dt} &= K_{i8}(Q_{ref} - Q_{gen}) \\ \frac{dx_9}{dt} &= K_{i9}(K_{p8}(Q_{ref} - Q_{gen}) + x_8 - i_{dr}) \\ \frac{dx_{10}}{dt} &= i_{drefw} - i_{dw} \\ \frac{dx_{11}}{dt} &= i_{qrefw} - i_{qw} \\ i_{drefw} &= \frac{P_{ref}V_{wd} + Q_{ref}V_{wq}}{V_{wd}^2 + V_{wq}^2} \\ i_{qrefw} &= \frac{P_{ref}V_{wq} - Q_{ref}V_{wd}}{V_{wd}^2 + V_{wq}^2} \\ V_{Wshd} &= \frac{1}{2}m_wV_{dcW}.\cos(\delta - \delta_{Wsh}) \\ V_{Wshq} &= \frac{1}{2}m_wV_{dcW}.\sin(\delta - \delta_{Wsh}) \\ \frac{dm_{Wr}}{dt} &= \frac{K_{Wd}}{T_{Wd}}.(P_{Wdcref} - P_{Wdc}) - \frac{m_{Wr}}{T_{Wd}} \\ \frac{dm_W}{dt} &= \frac{1}{T_{mW}}(m_{Wr} - m_W) \\ \frac{d\omega_{sh}}{dt} &= \frac{K_\omega}{T_m}(\omega_{ref} - \omega) - \frac{\omega_{sh}}{T_m} \\ \frac{d\delta_{Wsh}}{dt} &= K_p\dot{\omega}_{sh} + K_i\omega_{sh}\end{aligned}$$

معادلات جبری

$$\begin{aligned}-V_{dr} + K_{p7}(K_{p6}(P_{ref} - P_{gen}) + x_6 - i_{qr}) + x_7 &= 0 \\ -V_{qr} + K_{p9}(K_{p8}(Q_{ref} - Q_{gen}) + x_8 - i_{dr}) + x_9 &= 0 \\ -P_{gen} + x_m(i_{qs}i_{dr} - i_{qr}i_{ds}) - R_s(i_{qs}^2 + i_{ds}^2) - (V_{qr}i_{qr} + V_{dr}i_{dr}) &= 0 \\ -Q_{gen} - x_s(i_{qs}^2 + i_{ds}^2) + x_m(i_{ds}i_{dr} + i_{qs}i_{qr}) &= 0 \\ V_{qs} - (R_{tr} + R_W)i_{Wq} - (x_{tr} + x_W)i_{Wd} - V_{Wshq} &= 0 \\ V_{ds} - (R_{tr} + R_W)i_{Wd} + (x_{tr} + x_W)i_{Wq} - V_{Wshd} &= 0 \\ -i_{GCq} + \frac{(V_{qr}i_{qr} + V_{dr}i_{dr})V_{qs}}{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} &= 0 \\ -i_{Gcd} + \frac{(V_{qr}i_{qr} + V_{dr}i_{dr})V_{ds}}{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} &= 0\end{aligned}$$

ج) پارامترها و متغیرهای به کار رفته در مقاله

جدول (ج-۱): پارامترها و متغیرهای به کار رفته در مقاله			
ردیف	پارامتر	توضیحات	
۱	i_{Ed}	مولفه d جریان سمت سیستم AC1	۶ مولفه q جریان خروجی ترانسفورماتور سمت سیستم AC1
۲	i_{Eq}	مولفه q جریان سمت سیستم AC1	ولتاژ خازن C ₁ در نقش فیلتر سمت سیستم AC1
۳	V_{pcc1d}	مولفه d ولتاژ نقطه PCC سمت سیستم AC1	جریان بخش اول خط HVDC
۴	V_{pcc1q}	مولفه q ولتاژ نقطه PCC سمت سیستم AC1	ولتاژ بخش اول خط HVDC
۵	i_{1d}	مولفه d جریان خروجی ترانسفورماتور سمت سیستم AC1	جریان بخش اول خط HVDC
			ولتاژ بخش اول خط HVDC
			جریان بخش دوم خط HVDC

۳۳	ω_{hub}	سرعت زاویه‌ای هاب	۱۳	V_{dc4}	ولتاژ خازن C4 در نقش فیلتر سمت سیستم AC1
۳۴	ω_{gen}	سرعت زاویه‌ای ژنراتور DFIG	۱۴	i_{H4}	جریان بخش دوم خط HVDC
۳۵	δ_{blade}	جابجایی زاویه‌ای پره‌ها	۱۵	i_{2d}	مولفه d جریان خروجی ترانسفورماتور سمت سیستم AC2
۳۶	δ_{hub}	جابجایی زاویه‌ای هاب	۱۶	i_{2q}	مولفه q جریان خروجی ترانسفورماتور سمت سیستم AC2
۳۷	δ_{gen}	جابجایی زاویه‌ای ژنراتور DFIG	۱۷	V_{pcc2d}	مولفه d ولتاژ نقطه PCC سمت سیستم AC2
۳۸	i_{qs}	مولفه q جریان استاتور ژنراتور DFIG	۱۸	V_{pcc2q}	مولفه q ولتاژ نقطه PCC سمت سیستم AC2
۳۹	i_{ds}	مولفه d جریان استاتور ژنراتور DFIG	۱۹	i_{Bd}	مولفه d جریان سمت سیستم AC2
۴۰	i_{qr}	مولفه q جریان روتور ژنراتور DFIG	۲۰	i_{Bq}	مولفه q جریان سمت سیستم AC2
۴۱	i_{dr}	مولفه d جریان روتور ژنراتور DFIG	۲۱	θ_1	زاویه فاز PLL1
۴۲	X_{1_DFIG}	متغیر کنترلی سیستم کنترل توان اکتیو ژنراتور DFIG	۲۲	ω_1	فرکانس زاویه‌ای PLL1
۴۳	X_{2_DFIG}	متغیر کنترلی سیستم کنترل توان اکتیو ژنراتور DFIG	۲۳	θ_2	زاویه فاز PLL2
۴۴	X_{3_DFIG}	متغیر کنترلی سیستم کنترل توان راکتیو ژنراتور DFIG	۲۴	ω_2	فرکانس زاویه‌ای PLL2
۴۵	X_{4_DFIG}	متغیر کنترلی سیستم کنترل توان راکتیو ژنراتور DFIG	۲۵	X_1	متغیر کنترلی سیستم کنترل جریان مبدل VSC1
۴۶	I_{qw}	مولفه q جریان خروجی مزرعه بادی	۲۶	X_2	متغیر کنترلی سیستم کنترل جریان مبدل VSC1
۴۷	I_{dw}	مولفه d جریان خروجی مزرعه بادی	۲۷	X_3	متغیر کنترلی سیستم کنترل جریان مبدل VSC2
۴۸	m_{wr}	متغیر کنترلی کنترل کننده توان اکتیو مبدل VSC3	۲۸	X_4	متغیر کنترلی سیستم کنترل جریان مبدل VSC2
۴۹	m_{wv}	متغیر کنترلی کنترل کننده توان اکتیو مبدل VSC3	۲۹	X_5	متغیر کنترلی سیستم کنترل کننده ولتاژ DC مبدل VSC2
۵۰	D_{wsh}	متغیر کنترلی کنترل کننده تکمیلی مبدل VSC3	۳۰	V_{dcw}	ولتاژ لینک DC متصل به مزرعه بادی
۵۱	δ_{wsh}	متغیر کنترلی کنترل کننده تکمیلی مبدل VSC3	۳۱	i_{HW}	جریان لینک DC متصل به مزرعه بادی
			۳۲	ω_{blade}	سرعت زاویه‌ای پره‌ها

مراجع

- [9] J. Beerten, GB. Diaz, S. DAcro, JA. Suul, Identification and Small-Signal Analysis of Interaction Modes in VSC MTDC Systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2015; 31(2): 888–897.
- [10] Y. Meng, H. Wang, Z. Duan, F. Jia, Z. Du, X. Wang, Small-signal Stability Analysis and Improvement with Phase-shift Phase-locked Loop Based on Back Electromotive Force Observer for VSC-HVDC in Weak Grids. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2022; 11(9): 980–989.
- [11] Heidary Yazdi S S, Milimonfared J, Fathi S H. Unified Control Structure to Evaluate Grid Code Compatibility of HVDC Interfaced Offshore Wind Power Plant. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2019; 16 (3) :87-100
- [12] H. Xiao, Z. Xu, G. Tang, Y. Xue, Complete Mathematical Model Derivation for Modular Multilevel Converter Based on Successive Approximation Approach. IET Power Electron. 2015; 8(12): 2396-2410.
- [13] F.D. Bianchia, J.L. Domínguez-García, O. Gomis-Bellmunt, Control of Multi-Terminal HVDC Networks Towards Wind Power Integration: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016; 55: 1055-1068.
- [14] O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, J. Ekanayake, R. King, N. Jenkins, Topologies of Multiterminal HVDC-VSC Transmission for large Offshore Wind farms. Electric Power Systems Research. 2011; 18(2): 271-281.
- [15] T. Tian, X. Kestelyn, O. Thomas, Normal Form based Analytical Investigation of Nonlinear Power System Dynamics under Excitation. IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017; 16-20.
- [16] A. Zheng, C. Guo, P. Cui, et al. Comparative Study on Small-Signal Stability of LCC-HVDC System With
- [1] R. Z. Davarani, R. Ghazi, N. Pariz, Non-linear analysis of DFIG based wind farm in stressed power systems. IET Renewable Power Generation. 2014; 8(8): 867–877.
- [2] IRENA (2021), Renewable Energy Statistics 2021. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-\(Accessed on: 7 Feb, 2022\).](https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-(Accessed on: 7 Feb, 2022).)
- [3] R. Shah, JC. Sanchez, R. Preece, M. Barnes, Stability and Control of Mixed AC–DC Systems with VSC-HVDC: A Review. IET Generation, Transmission & Distribution. 2018;31(10): 2207–2219.
- [4] J. Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission. 2nd ed, IEE.1998
- [5] H. Xiao, K. Sun, J. Pan, L. Xiao, C. Gan, Y. Liu, Coordinated frequency regulation among asynchronous AC grids with an MTDC system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 126, Part A, (2021)
- [6] EP. Araujo, FD. Bianchi, AJ. Ferré, OG. Bellmunt, Methodology for Droop Control Dynamic Analysis of Multiterminal VSC-HVDC Grids for Offshore Wind Farms. IEEE Transactions on Power Delivery. 2011; 26(4): 2476–2485.
- [7] H. Xiao, K. Sun, J. Pan, Y. Li, Y. Liu, Review of hybrid HVDC Systems Combining Line Communicated Converter and Voltage Source Converter. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021; 129.
- [8] C. Guo, W. Liu, C. Zhao, Iravani RA. Frequency-Based Synchronization Approach for the VSC-HVDC Station Connected to a Weak AC Grid. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017; 32(3): 1460-1470.

- of Controller Coefficients. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;1-29.
- [34] X. Zhang, J. Bai, G. Cao, C. Chen, Optimizing HVDC Control Parameters in Multi-Infeed HVDC System Based on Electromagnetic Transient Analysis. *Electrical Power and Energy Systems*. 2013; 49: 449-454.
- [35] C. Guoy, W. Liu, C. Zhao, X. Ni, Small-Signal Dynamics and Control Parameters Optimization of Hybrid Multiinfeed HVDC System. *Electrical Power and Energy Systems*. 2019; 98: 409-418.
- [36] C. Guo, P. Cui, C. Zhao, Optimization and Configuration of Control Parameters to Enhance Small-signal Stability of Hybrid LCC-MMC HVDC System. *journal of modern power systems and clean energy*. 2022; 10(1): 213-221.
- [37] T. Huang, F. Yang, D. Zhang, X. Chen, High-Frequency Stability Analysis and Impedance Optimization for an MMC-HVDC Integrated System Considering Delay Effects. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2022; 12(1): 59-72.
- [38] T. Huang, T. Cao, Z. Ran, B. Wang, Q. Liu, Parameter Optimization Method of MMC Controls Based on Firefly Algorithm. Paper presented at the IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). 2019 May; 21-24.
- [39] HY. Mahmoud, HM. Hasanien, AH. Besheer, AY. Abdelaziz, Hybrid Cuckoo Search Algorithm and Grey Wolf Optimiser-Based Optimal Control Strategy for Performance Enhancement of HVDC-Based Offshore Wind Farms. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020; 14(10): 1902-1911.
- [40] A. Ahmad, SAR. Kashif, et al. Controller Parameters Optimization for Multi-Terminal DC Power System Using Ant Colony Optimization. *IEEE Access*. 2021; 9, 59910-59919.
- [41] NA. Mohamed, HM. Hasanien, EA. Al-Ammar, MT. Véliz, RA. Turkey, F. Jurado, AO. Badr, Gorilla Tropical Optimization Algorithm Solution for Performance Enhancement of Offshore Wind Farm. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023; 17(10): 2388-2400.
- [42] A. Raza, X. Dianguot, S. Sunwen, L. Wiexing, Modeling and Control of Multi Terminal VSC HVDC Transmission System For Integrating Large Offshore Wind Farms. 17th IEEE International Multi Topic Conference. 2014.
- [43] M. Khenara, J. Adabia, E. Pouresmaeil, A. Gholamiana, J.P.S. Catalão, A Control Strategy for A Multi-Terminal HVDC Network Integrating Wind Farms to The AC Grid. *International Journal of Electrical Power & Eneergy Systems*. 2017; 89: 146-155.
- [44] R. Billinton, C. Wu, G. Singh, Extreme Adverse Weather Modeling in Transmission and Distribution System Reliability Evaluation. 14th Power Systems Computation Conference, 2002; 24-28.
- [45] D.M. Wrad, The Effect of Weather on Grid Systems and The Reliability of Electricity Supply. Springer Science. 2013; 121, 103-113.
- [46] <https://marketscale.com/industries/building-management/how-does-weather-affect-the-electrical-grid>.
- [47] Pulgar-Painemal HA. Wind Farm Model for Power System Stability Analysis. Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign. 2010.
- Different Control Strategies at The Inverter Station. *IEEE Access*. 2019; 7: 34946-34953.
- [17] C. Guo, C. Zhao, R. Iravani, H. Ding, X. Wang, Impact of Phase-Locked Loop on Small-Signal Dynamics of The Line Commutated Converterbased High-Voltage Direct-Current Station. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017; 11(5): 1311-1318.
- [18] C. Guo, Z. Yin, C. Zhao, R. Iravani, Small-Signal Dynamics of Hybrid LCC-VSC HVDC Systems. *Electrical Power & Energy Systems*. 2018; 98: 362-372.
- [19] C. Guo, A. Zheng, Z. Yin, C. Zhao, Small-Signal Stability of Hybrid Multi-Terminal HVDC System. *Electrical Power & Energy Systems*. 2019; 109: 434-443.
- [20] C. Guo, Z. Yin, Y. Wang, et al. Investigation on Small-Signal Stability of Hybrid LCC-MMC HVDC System. *Proceedings of the CSEE*. 2019; 39(4): 1040-1052.
- [21] Y. Wang, C. Zhao, R. Iravani, Small Signal Stability Investigation of the MMC-HVDC Grid. *IEEE transactions on power delivery*. 2022; 37(5): 4448-4459.
- [22] L.M. Castro, E. Acha, On the Dynamic Modeling of Marine VSC-HVDC Power Grids Including Offshore Wind Farms. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2020; 11(4): 2889-2900.
- [23] F. Ahmadloo, SP. Azad, Grid interaction of multi-VSC systems for renewable energy integration. *IET Renewable Power Generation*. 2023; 17(5): 1212-1223.
- [24] F. Ahmadloo, SP. Azad, A Robust Controller Design for Mitigating Control Loop Interactions in Multi-VSC Systems Built by Multiple Vendors. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. 2022 July; 17-21.
- [25] H. Li, Y. Sun, J. Lin, Z. Liu, Y. Liu, M. Su, Impedance Modeling, Measurement and Stability Analysis of Multi-VSC Systems in $\alpha\beta$ Coordinate. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2024; Early Access.
- [26] S. Ruixin, Y. Songhao, H. Zhiguo, Stability Analysis of Sub-/Super-Synchronous Oscillation Based on Closed-Loop Transfer Function Poles of D-PMSG Wind Power Systems. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2022; 17(9): 1267-1275.
- [27] Y. Xue, F. Ge, Z. Zhao, et al. Control Strategy for Hybrid LCC-C-MMC HVDC System Under AC Fault at Rectifier Side. *The Journal of Engineering (IET)*, 2019; 16: 3259-3263.
- [28] D. Xing, J. Su, D. Hu, et al. Solution to Reduce Voltage Stress of Submodule in LCC-MMC Transmission System at The Condition of Communication Fault. *The Journal of Engineering (IET)*. 2019; 16: 1873-1876.
- [29] D. Dimitropoulos, X. Wang, F. Blaabjerg, Stability Analysis in Multi-VSC (Voltage Source Converter) Systems of Wind Turbines. *Applied sciences*. 2024; 14(8).
- [30] P. Zuowei, Y. Zhun, L. Xiuting, L. Yefeng, Y. Tao, Deep Koopman model predictive control for enhancing transient stability in power grids. *Int J Robust Nonlinear Control*. 2021, 31(6): 1964-1978.
- [31] C. Guo, J. Zhang, S. Yang, H. Li, C. Fu, A Modified Dynamic Model and Small-Signal Stability Analysis for LCC-HVDC System. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2022; 1-9 (Early Access).
- [32] Golpîra H, Bevrani H. A New Measurement-Based Approach for Power System Small Signal stability and Voltage Regulation Enhancement . *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2019; 16 (3) :61-72
- [33] A. Ziaei, R. Ghazi, RZ. Davarani, Interaction Analysis of Multi-terminal Direct Current Transmission Systems Connected to Wind Farm: Determining the Optimal Range