

Improving the Dynamic Stability of Power Grids Including Offshore Wind Farms and Equipped with HVDC Transmission System Using Adaptive Neural Controller

Abdolkhalegh Hamidi, *PhD Student*, Jamal Beiza, *Assistant Professor*, Taher Abedinzadeh, *Assistant Professor*, Ali Daghigh, *Assistant Professor*

Department of Electrical Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran
abzhamidi@yahoo.com
jamalbeiza@gmail.com
taherabedinzade@yahoo.com
A_daghigh@sbu.ac.ir

Abstract:

The purpose of this paper is to improve the dynamic stability of power systems equipped with offshore wind farms and HVDC transmission lines. Since wind farms are affected by environmental factors and cannot have a constant production capacity, the effect of wind turbine and HVDC system on power oscillation mode is investigated and a suitable solution for selecting input-output signals and stabilizing complementary controller design is proposed. In the proposed method, using the concepts of controllability, observability and decomposition of single values, the best path for the design of the complementary controller is selected among the input-output signals, then the stabilizer controller is designed based on neural networks and to improve frequency Stability-Voltage is used. The simulation results show that the proposed controller performs better than the classical controllers in terms of response speed, settling time, and voltage fluctuations in the presence of disturbances and confirms the performance of the selected control system.

Keywords: Stability of power system, adaptive neurotransmitter, offshore wind farms, HVDC system

Received: 22 December 2019

Revised: 28 March 2020

Accepted: 19 June 2020

Corresponding Author: Dr. Jamal Beiza

Citation: A. Hamidi, J. Beiza, T. Abedinzadeh, A. Daghigh, "Improving the dynamic stability of power grids including offshore wind farms and equipped with HVDC transmission system using adaptive neural controller", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 79-99, Summer 2020 (in Persian).

بهبود پایداری دینامیکی شبکه‌های قدرت شامل مزارع بادی فراساحلی و مجهز به سیستم انتقال HVDC با استفاده از کنترل کننده عصبی تطبیقی

عبدالخالق حمیدی، دانشجوی دکتری، جمال بیضاء، استادیار، طاهر عابدینزاده، استادیار. علی دقیق، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

abzhamidi@yahoo.com

jamalbeiza@gmail.com

taherabedinzade@yahoo.com

a_daghigh@sbu.ac.ir

چکیده: هدف از این مقاله بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به مزارع بادی فراساحلی و انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) است. از آنجا که مزارع بادی تحت تاثیر عوامل محیطی بوده و نمی‌توانند توان تولیدی ثابتی داشته باشند، لذا تاثیر توربین بادی و سیستم HVDC بر مود نوسانی سیستم قدرت بررسی شده و راه کار مناسبی جهت انتخاب سیگنال‌های ورودی - خروجی و طراحی کنترل کننده تکمیلی پایدار ساز پیشنهاد می‌گردد. در روش پیشنهادی، با استفاده از مفاهیم کنترل-پذیری و مشاهده‌پذیری و تجزیه مقادیر تکین، بهترین مسیر جهت طراحی کنترل کننده تکمیلی میراساز در بین سیگنال‌های ورودی - خروجی انتخاب می‌شود، سپس کنترل کننده پایدار ساز مبتنی بر شبکه‌های عصبی طراحی شده و جهت بهبود پایداری فرکانس-ولتاژ، بکار گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده‌های کلاسیک، عملکرد بهتری از نظر سرعت پاسخ، زمان نشست و فراجهدش داشته، و نوسانات ولتاژ و فرکانس را بخوبی در حضور اغتشاشات میراسازی می‌نماید و موید کارایی سیستم کنترلی انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: پایداری سیستم قدرت، کنترل کننده عصبی تطبیقی، مزارع بادی فراساحلی، سیستم HVDC

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۳/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جمال بیضاء

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شبستر - جنب پارک اژادگان - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر

۱- مقدمه

با توجه به مشکلات زیست محیطی ناشی از فعالیت نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی و یا هسته‌ای استفاده می‌کنند، امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این میان، انرژی باد به علت هزینه پایین‌تر تولید برق نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر از مقبولیت بیشتری برخوردار است. با توجه به شرایط محیطی و اقلیمی مناسب سطح دریاها برای ورزش باد، مزارع بادی فراساحلی گزینه مناسبی برای استخراج توان الکتریکی از این شرایط هستند. در حال حاضر یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش انتقال توان در مزارع بادی، بکارگیری خطوط انتقال جریان مستقیم با کنترل منبع ولتاژ^۲ است. این ادوات خود می‌توانند بعنوان سدی در برابر اغتشاشات بوجود آمده در سیستم عمل کرده که مانع بوجود آمدن خاموشی گسترده^۳ در سیستم شده و در بهبود پایداری شبکه‌های قدرت موثر هستند. البته در این حالت لازم است تا کنترل‌های لازم برای سیستم طراحی و بکار گرفته شوند [۱،۲].

به علت ساختار و عملکرد متفاوت نیروگاه‌های بادی با نیروگاه‌های معمول، کیفیت توان و پایداری شبکه قدرت می‌تواند تحت تاثیر عملکرد مزارع بادی قرار گیرد. لذا نفوذ بالای انرژی باد در شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع توان که متشکل از ژنراتورهای سنکرون زیادی است، می‌تواند منجر به طراحی مجدد سیستم شود [۳،۴].

اپراتورهای سیستم قدرت نیز نگران تاثیرات منفی و عدم پشتیبانی مزارع بادی از شبکه‌های قدرت معمول هستند و تلاش می‌کنند تا با افزودن کنترل‌کننده‌های تکمیلی به این نیروگاه‌ها، قابلیت اطمینان و حاشیه پایداری شبکه‌های قدرت را بهبود بخشند [۵،۶]. برای بهبود عملکرد سیستم قدرت ترکیبی شامل نیروگاه‌های معمول و منابع توان بادی، استفاده از سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا^۳ (HVDC) پیشنهاد شده‌اند. این سیستم‌ها علاوه بر اینکه جریان توان در سیستم را بدون وابستگی به شرایط سیستم کنترل می‌کنند، باعث بهبود پایداری دینامیکی سیستم (میراسازی نوسانات توان) نیز می‌شوند.

اغلب نیروگاه‌های بادی در ساختار خود از ژنراتورهای القایی استفاده می‌کنند. این ژنراتورها جذب کننده توان راکتیو هستند و از این رو می‌توانند بر روی ولتاژ نقطه اتصال به شبکه موثر باشند. از سویی دیگر مقدار ورزش باد در زمان‌های مختلف شبانه روز متفاوت خواهد بود و لذا توان اکتیو تزریقی به شبکه از جانب نیروگاه بادی (و همچنین فرکانس توان تولیدی) نیز می‌تواند متغیر باشد [۷]. بطور کلی منابع تولید توان بادی بر روی مولفه‌های ولتاژ و فرکانس شبکه تاثیر گذار هستند، می‌توان با استفاده از کنترل‌کننده‌های مناسب و همچنین تشخیص کولپلینگ مناسب بین ورودی‌ها و خروجی‌های در نظر گرفته شده برای سیستم قدرت، نوسانات ناشی از بروز اغتشاشات در سیستم را با استفاده از مدارات کنترلی این ادوات بهبود بخشید.

از آنجا که مود نوسانی موجود در سیستم‌های قدرت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و تحت تاثیر اغتشاش ممکن است موجب ناپایداری سیستم گردد لذا در سال‌های اخیر محققین بسیاری تاثیر توربین بادی و سیستم HVDC را بر مود نوسانی سیستم قدرت مورد بررسی قرار داده‌اند. در مراجع [۸] و [۹] مدل‌سازی دینامیکی توربین‌های بادی مناسب برای مطالعه پایداری سیستم قدرت (پایداری گذرا و دینامیکی) مورد بررسی قرار گرفته است. از مهمترین اهداف در این مقاله‌ها ارائه استراتژی‌های کنترلی است که بر اساس آن رفتار ژنراتورهای القایی به ژنراتورهای سنکرون نزدیک خواهد شد و لذا مزارع بادی می‌توانند پشتیبانی لازم از ولتاژ و فرکانس شبکه را در شرایط بروز خطا انجام دهند. با این حال چگونگی کولپلینگ سیگنال‌های ورودی-خروجی با هدف طراحی کنترل‌کننده‌های موثر بر پایداری شبکه‌های قدرت در توربین‌های بادی مورد بحث این مقاله‌ها نبوده است

در تحقیقاتی دیگر نویسندگان به بررسی تاثیرگذاری توربین‌های بادی بر میراسازی نوسانات بوجود آمده در سیستم قدرت و آنالیز حساسیت مدهای الکترومکانیکی در اینرسی ژنراتورها پرداخته‌اند. بر اساس تحقیق ارائه شده در مرجع [۱۰] توربین‌های بادی با سرعت ثابت، که ژنراتورهای القایی با روتور قفس سنجابی را می‌چرخاند بر روی میراسازی مدهای نوسانی سیستم قدرت تاثیر گذار هستند. در مرجع [۱۱] نویسندگان نشان داده‌اند که مدهای الکترومکانیکی سیستم قدرت تحت تاثیر اندازه-زاویه ولتاژ توربین‌های بادی در محل اتصال به شبکه هستند. در مرجع [۱۲] نشان داده شده است که تاثیر توربین‌های بادی بر روی میراسازی مدهای بین ناحیه‌ای بیشتر از مدهای محلی هستند. در این تحقیق نشان داده شده که در صورت قرارگیری واحدهای تولیدی مذکور در شبکه‌های ضعیف قدرت، توربین‌های بادی می‌توانند بطور موثری بر میراسازی نوسانات در شرایط بار کامل مشارکت داشته باشند. در مرجع [۱۳] آنالیز حساسیت مدهای الکترومکانیکی در اینرسی ژنراتورها معرفی گردیده است. در این

مقاله اشاره می‌شود که وجود بارهای غیرخطی و حساس به فرکانس در شبکه قدرت با نفوذ نسبتاً بالای توربین‌های بادی نیازمند استفاده از کنترل‌کننده‌هایی است که پایداری و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش دهند. در این تحقیقات استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی برای بهبود حاشیه پایداری سیستم قدرت از طریق کنترل توربین‌های بادی مورد بحث قرار نگرفته است.

یکی از عوامل موثر در تضمین پایداری سیستم میزان نفوذ این توربین‌های بادی است. نفوذ بالای توربین‌های بادی در شبکه‌های قدرت منجر به کاهش اینرسی سیستم در مقابل اغتشاشات خواهد شد و این مسئله می‌تواند حاشیه پایداری سیستم را بشدت تحت تاثیر قرار دهد [۱۴، ۱۵]. جهت جلوگیری از این تاثیر منفی مزارع بادی در تحقیقاتی، استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی جهت بهبود پایداری گذرا و دینامیکی سیستم‌های قدرت را پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۱۵] کنترل‌کننده تکمیلی برای توربین بادی مبتنی بر DFIG (ژنراتور القایی دو سوتغذیه) ^۴ طراحی گردیده است. در مرجع مذکور جهت جلوگیری از این تاثیر منفی مزارع بادی، کنترل‌کننده تکمیلی برای خود توربین بادی پیشنهاد می‌شود. در مرجع [۱۶] پیشنهاد استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی در مزارع بادی بر اساس الگوریتم‌های تکاملی ارائه گردیده است. البته مراجع فوق فرض را بر این قرار داده‌اند که طراحی کنترل‌کننده‌های تکمیلی برای مزارع بادی می‌تواند نوسانات فرکانس و ولتاژ در سیستم قدرت را کاهش دهد. لذا آنالیز سیگنال کوچک در مقاله‌های مذکور صورت نگرفته است و تمرکز نویسندگان بر روی کنترل اضافی اعمال شده به مدارات کنترلی DFIGها است. علاوه بر این کنترل پیشنهادی پیچیده بوده و مختص شرایط کاری نامی است.

جهت تعریف و پیاده‌سازی استراتژی کنترل تکمیلی برای هر سیستم دینامیکی لازم است تا سیگنال‌های ورودی-خروجی مشخص باشند [۱۷، ۱۸]. علاوه بر این لازم است تا بهترین مسیر برای طراحی کنترل‌کننده (با توجه به اهداف تعریف شده توسط طراح) در بین سیگنال‌های ورودی-خروجی تعیین گردد تا بدین ترتیب هزینه‌های کنترل سیستم کاهش یابد [۱۹].

از آنجا که مود نوسانی موجود در سیستم‌های قدرت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و تحت تاثیر اغتشاش ممکن است موجب ناپایداری سیستم گردد لذا تاثیر توربین بادی و سیستم HVDC بر این مود بررسی خواهد شد. هدف این مقاله بررسی تاثیرگذاری عملکرد توربین‌های بادی بر پایداری سیستم قدرت و نهایتاً طراحی کنترل‌کننده تکمیلی و پایدارساز است. بنابراین مطابق سایر مطالعات صورت گرفته در این زمینه، تغییرات سرعت روتور، تغییرات زاویه بار روتور در ژنراتور سنکرون بعنوان خروجی‌های سیستم تعریف می‌شود. زمانی که منابع تولید پراکنده موجود در شبکه ترکیبی بعنوان یک بار منفی مدل‌سازی می‌شوند، می‌توانند در بهبود پایداری سیستم قدرت مشارکت داشته باشند. لذا جهت بررسی تاثیر گذاری مزرعه بادی بر مود نوسانی، توربین بادی بعنوان یک بار منفی که امکان تبادل توان اکتیو و راکتیو را دارد، مدل‌سازی شده است. از آنجا که ولتاژ ترمینال توربین بادی می‌تواند مستقیماً بر روی چگونگی تبادل توان از طریق سیستم انتقال HVDC VSC موثر باشد. بنابراین مناسب است تا در توربین بادی، مولفه ولتاژ ترمینال نیز بعنوان خروجی در نظر گرفته شود.

از سویی دیگر توان‌های تزریقی اکتیو و راکتیو توسط توربین‌های بادی به شبکه که از طریق سیستم HVDC به شبکه اصلی تزریق می‌شوند، تغییرات ورودی پایدارسازی سیستم قدرت و همچنین ورودی‌های سیستم HVDC شامل تغییرات زاویه و اندیس مدولاسیون در یکسوکننده و اینورتر را می‌توان بعنوان ورودی‌های سیستم معرفی نمود.

علاوه بر دیدگاه فیزیکی در انتخاب سیگنال‌های مناسب جهت طراحی کنترل‌کننده‌های کمکی، از جمله ابزاری که در این راستا می‌توان مورد استفاده قرار داد، کنترل‌پذیری مودهای نوسانی سیستم از طریق ورودی‌ها و همچنین مشاهده‌پذیری مودهای نوسانی از طریق خروجی‌های سیستم است. اندازه‌گیری مقدار کنترل‌پذیری (مشاهده‌پذیری) مودها از طریق ورودی (خروجی) می‌تواند گزینه مناسبی برای انتخاب موثرترین ورودی (خروجی) بر رفتار مود نوسانی شبکه قدرت باشد. لذا در این مقاله جهت بررسی اثرگذاری توربین بادی و سیستم HVDC بر مود نوسانی سیستم قدرت، راه‌کار جدیدی جهت انتخاب سیگنال‌های ورودی-خروجی و طراحی کنترل‌کننده تکمیلی پایدارساز پیشنهاد می‌گردد. در روش پیشنهادی، با استفاده از مفاهیم کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری و تجزیه مقادیر تکین، بهترین مسیر جهت طراحی کنترل‌کننده تکمیلی میراساز در بین سیگنال‌های ورودی-خروجی انتخاب می‌شود.

با انتخاب بهترین مسیر سیگنال‌های ورودی- خروجی بحث طراحی کنترل‌کننده که نقش میراساز نوسانات را در سیستم بازی کند حائز اهمیت خواهد شد. نوع کنترل‌کننده در این مقاله از نوع کنترل‌کننده عصبی تطبیقی انتخاب می‌شود تا بعنوان یک کنترل‌کننده میراساز نوسانات عمل نموده و نوسانات بوجود آمده در سیستم در اثر اغتشاش در کمترین زمان ممکن میراسازی شوند. این کنترل‌کننده تطبیقی بوده و بر خلاف کنترل‌کننده‌های کلاسیک، با تغییر شرایط کاری سیستم می‌تواند پارامترهای موثر خود را بروزرسانی نموده و سیگنال مناسب میراساز را با هدف حاشیه پایداری شبکه تولید کند.

به‌منظور بررسی راه‌کار پیشنهادی مدل‌سازی یک سیستم قدرت مجهز به ژنراتور سنکرون، خط انتقال HVDC و همچنین یک نمونه مزرعه بادی دریایی بعنوان بار منفی انجام خواهد شد. این مدل می‌تواند چگونگی تاثیرگذاری توربین‌های بادی و سیستم‌های انتقال مربوط به آنها یعنی خطوط انتقال HVDC را بر عملکرد پایدار سیستم قدرت نمایش دهد. شبیه‌سازی مدل تحت مطالعه در نرم‌افزار متلب انجام شده است. پاسخ‌های بدست آمده از روش پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و همچنین نتایج با کنترل‌کننده کلاسیک مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۲- مدل‌سازی سیستم

پایداری دینامیکی به معنای حفظ شرایط جدید بعد از ایجاد یک اغتشاش با دامنه کوچک در سیستم است. ورود هر گونه اغتشاشی به سیستم قدرت می‌تواند مولفه‌های فرکانس-ولتاژ را تحت تاثیر قرار دهد. از سیستم قدرت با طراحی مناسب انتظار می‌رود که در هر شرایطی توان را در فرکانس-ولتاژ معین در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد. یعنی بروز اغتشاش مولفه‌های مذکور را از مقادیر نامی تعریف شده منحرف نکند [۱۶، ۱۷]. امروزه بحث پایداری سیستم‌های قدرت بویژه در حضور توربین‌های بادی، یکی از مهم‌ترین مباحث دینامیکی مطرح بین متخصصین صنایع توان است. وجود توربین‌های بادی به‌عنوان منبع انرژی نو و تجدیدپذیر در یک شبکه قدرت باعث می‌شود تا منابعی با ساختار و عملکرد متفاوت با منابع نیروگاهی کلاسیک وارد سیستم قدرت شوند.

یک سیستم قدرت که مجهز به سیستم VSC HVDC است شرایط مناسبی را برای کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو فراهم می‌کند. کنترل این دو توان به معنای کنترل، به ترتیب فرکانس و اندازه ولتاژ است. نگرانی متخصصین از نفوذ گسترده منابع تولید پراکنده بویژه منابع بادی از این بابت است که این ادوات نمی‌توانند بر امر پایدارسازی ولتاژ-فرکانس سیستم به ویژه در شرایط بروز خطا به مانند منابع نیروگاهی کلاسیک مشارکت داشته باشند. این امر به علت ساختمان و استراتژی کنترلی متفاوت منابع تولید پراکنده (منابع بادی) در مقایسه با منابع نیروگاهی معمول است. بنابراین اگر به هر نحوی (چه از طریق مدیریت انرژی و چه از طریق طراحی کنترل‌کننده‌های تکمیلی پایدارساز در منابع انرژی تجدیدپذیر و نو) امکان به‌کار گرفتن منابع تولید پراکنده در امر بهبود پایداری شبکه فراهم گردد، قدم بزرگی در توسعه سیستم‌های قدرت از طریق احداث منابع انرژی تجدیدپذیر و نو برداشته شده است.

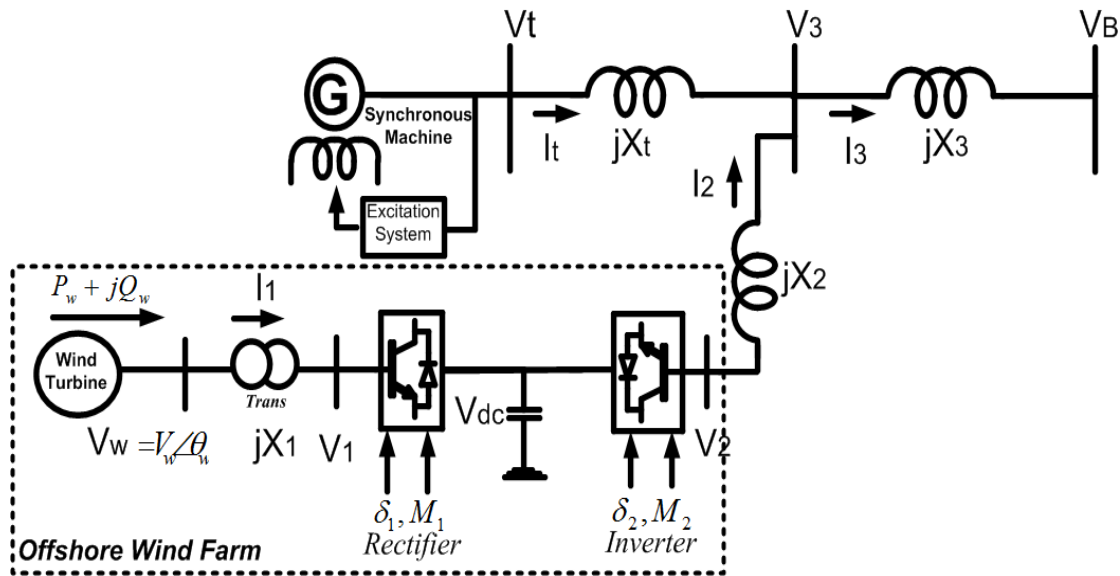
تحریک موده‌های نوسانی سیستم قدرت در شرایط بروز خطا می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم گردد و این امر می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را شدیداً تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین باید بررسی کرد که تا چه میزان منابع تولید پراکنده بر این مودها تاثیر گذار هستند. در گام بعدی لازم است تا کنترل‌کننده تکمیلی میراسازی طراحی شده و در مسیر مناسب بین سیگنال‌های ورودی- خروجی نصب گردد.

در ادامه مدل‌سازی یک سیستم قدرت مجهز به مزارع بادی، سیستم VSC HVDC و ژنراتورهای سنکرون انجام می‌شود. در مدل‌سازی انجام شده فرض می‌شود که توربین بادی به‌عنوان یک بار منفی فعالیت می‌کند. بدین معنا که امکان تولید توان اکتیو و راکتیو و کنترل مستقل آنها را فراهم می‌کند.

۲-۱- ساختار سیستم قدرت تحت مطالعه

سیستم قدرت تحت مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم ژنراتور سنکرونی را نشان می‌دهد که از طریق خطوط انتقال به باس بی‌نهایت متصل شده است. از سوی دیگر مزرعه بادی فراساحلی است که شامل توربین بادی و سیستم VSC

HVDC است. فرض شده است که توربین بادی می‌تواند توان‌های اکتیو و راکتیو معینی را تولید و با شبکه تبادل کند. خط انتقال VSC HVDC وظیفه این تبادل توان را بر عهده دارد. هر یک از مبدل‌ها در حالت دائمی مقادیر شاخص مدولاسیون $M_{1,2}$ و زاویه فاز $\delta_{1,2}$ مختص خود را دارند که در مقادیر ثابت تنظیم شده‌اند. ولتاژ باس خروجی مزرعه بادی با $V_w \angle \theta_w$ است. خازن DC علاوه بر اینکه می‌تواند نوسانات ولتاژ خط DC را کاهش دهد، به مبدل‌ها کمک می‌کند تا ولتاژ خروجی تثبیت شده‌ای را فراهم کنند.



شکل (۱): سیستم قدرت تحت مطالعه
Figure (1): Power system under study

۲-۲- توصیف دینامیکی سیستم قدرت

معمولاً با توجه به اینکه مدل‌سازی مطالعات دینامیکی در فرکانس پایین انجام می‌شود از کلیدزنی کلیه مبدل‌ها و همچنین مقاومت خطوط صرف‌نظر می‌شود. در گام اول مدل‌سازی لازم است تا جریان‌های تزریقی ژنراتورها بر حسب ورودی‌ها و متغیرهای حالت سیستم نوشته شوند و سپس این جریان‌ها حول نقطه کاری خطی سازی می‌شوند. بر اساس مدل خطی جریان‌های تزریقی، سایر متغیرهای حالت و خروجی‌های سیستم بازنویسی می‌شوند. در این مقاله از مدل مرتبه سوم ماشین سنکرون که به مدل هفرون فیلیپس مشهور است، استفاده شده است. رابطه بین باس بی‌نهایت و باس خروجی ژنراتور سنکرون برابر است با:

$$V_t = jX_t I_t + jX_3 I_3 + V_B \quad (1)$$

در این رابطه منظور از V_t ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون و I_t جریان تزریقی ژنراتور به شبکه است. X_t و X_3 راکتانس‌های خطوط و ترانسفورماتوری هستند که ژنراتور را به شبکه متصل نموده است. V_B نیز نشان دهنده ولتاژ باس بی‌نهایت است. جریان تزریق شده به باس بی‌نهایت را می‌توان از جمع جریان‌های هر دو ژنراتور به دست آورد:

$$I_3 = I_2 + I_t = \frac{V_2 - V_3}{jX_2} + I_t = \frac{V_2}{jX_2} - \frac{V_3}{jX_2} + I_t \quad (2)$$

دو رابطه (۱) و (۲) معادله V_t را به شکل زیر تبدیل خواهد کرد:

$$V_t = jX_t I_t + \frac{X_3}{X_2} V_2 - \frac{X_3}{X_2} V_t + \frac{jX_3 X_t}{X_2} I_t + jX_3 I_t + V_B \quad (3)$$

دقت شود که کلیه معادله‌ها در مدل‌سازی در قاب مرجع dq0 نوشته می‌شوند.

$$I_t = I_{td} + jI_{tq}$$

$$V_t = V_{td} + jV_{tq} \quad (4)$$

در یک ژنراتور سنکرون ولتاژ ترمینال بر اساس رابطه‌های زیر به ولتاژ داخلی ماشین (E'_q) مرتبط می‌شود:

$$V_{td} = x_q I_{tq}, V_{tq} = E'_q - X'_d I_{td} \quad (5)$$

مولفه‌های اکتیو و راکتیو رابطه (۳) را می‌توان با جداکردن بخش‌های موهومی و حقیقی از هم جدا نمود:

$$Z_2 X_q I_{tq} - Z_3 V_{2d} - V_{Bd} = -Z_1 I_{tq}$$

$$Z_2 E'_q - Z_2 X'_d I_{td} - Z_3 V_{2q} - V_{Bq} = Z_1 I_{td} \quad (۶)$$

برای ولتاژ باس بی‌نهایت $V_B = V_{Bd} + jB_{Bq} = V_B \sin(\delta) + jV_B \cos(\delta)$ متغیر δ زاویه بار نامیده می‌شود. بنابراین با ترکیب دو معادله اخیر و ساده‌سازی آن می‌توان جریان‌های تزریقی ژنراتور به شبکه را محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} I_{tq} &= Z_6 \cdot M_2 \cdot V_{dc} \cdot \cos \delta_2 - Z_7 \sin \delta \\ I_{td} &= Z_{10} E'_q + Z_8 \cdot M_2 \cdot V_{dc} \cdot \cos \delta_2 + Z_9 \cos \delta \end{aligned} \quad (۷)$$

با خطی‌سازی معادله (۷):

$$\begin{aligned} \Delta I_{tq} &= Z_{11} \Delta M_2 + Z_{12} \Delta V_{dc} + Z_{13} \Delta \delta_2 + Z_{14} \Delta \delta \\ \Delta I_{td} &= Z_{10} \Delta E'_q + Z_{15} \Delta M_2 + Z_{16} \Delta V_{dc} + Z_{17} \Delta \delta_2 + Z_{18} \Delta \delta \end{aligned} \quad (۸)$$

فرض می‌شود که توان‌های اکتیو در دو طرف مبدل یکسوکننده HVDC یکسان است. عبارتی دیگر می‌توان از مقدار تلفات در سیستم صرف‌نظر نمود. در چنین شرایطی برای خازن می‌توان نوشت:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3M_2}{4C_{Dc}} (\cos \delta_2 I_{2d} + \sin \delta_2 I_{2q}) + \frac{3M_1}{4C_{Dc}} (\cos \delta_1 I_{1d} + \sin \delta_1 I_{1q}) \quad (۹)$$

رابطه (۹) بیان می‌کند که توان تزریق شده از سمت سیستم‌های AC به سمت خط انتقال DC (که از طریق مبدل‌ها عبور می‌کند) با مقدار انرژی ذخیره شده در خازن برابر است. از آنجا که هدف مدل‌سازی سیستم قدرت و استخراج فضای حالت سیستم است، لذا معادله تعادل توان نیز باید خطی‌سازی شود. در این راستا ابتدا جریان‌های I_{2d} ، I_{2q} ، I_{1d} و I_{1q} بر اساس متغیرهای حالت سیستم محاسبه می‌شوند و سپس خطی‌سازی آنها انجام می‌شود. نتایج خطی‌سازی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \Delta I_{2d} &= Z_{25} \Delta E'_q + Z_{26} \Delta M_2 + Z_{27} \Delta V_{dc} + Z_{28} \Delta \delta_2 + Z_{29} \Delta \delta \\ \Delta I_{2q} &= Z_{35} \Delta M_2 + Z_{36} \Delta V_{dc} + Z_{37} \Delta \delta_2 + Z_{38} \Delta \delta \\ \Delta I_{1d} &= Z_{39} \Delta P_\omega + Z_{40} \Delta \theta_\omega + Z_{43} \Delta M_1 + Z_{44} \Delta \delta_1 + Z_{25} \Delta V_{dc} \\ \Delta I_{1q} &= Z_{46} \Delta \theta_\omega + Z_{47} \Delta P_\omega + Z_{48} \Delta \delta_1 + Z_{49} \Delta M_1 + Z_{50} \Delta V_{dc} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

ترکیب رابطه‌های (۹) و (۱۰) چنین نتیجه می‌دهد که:

$$\begin{aligned} \Delta V_{dc} &= Z_{56} \Delta M_2 + Z_{57} \Delta M_1 + Z_{58} \Delta \delta_1 + Z_{59} \Delta \delta_2 \\ &+ Z_{60} \Delta V_{dc} + Z_{61} \Delta E'_q + Z_{62} \Delta \delta + Z_{63} \Delta P_\omega + Z_{64} \Delta \theta_\omega \end{aligned} \quad (۱۱)$$

به همین ترتیب برای توان اکتیو تزریق توسط ژنراتور سنکرون به شبکه قدرت و با توجه به اینکه $P_e = V_d I_d + V_q I_q$ است، لذا خطی‌سازی این معادله نتیجه زیر را در بر خواهد داشت:

$$\Delta P_e = a_4 \Delta M_2 + a_5 \Delta \delta_2 + a_6 \Delta \delta + a_7 \Delta V_{dc} + a_8 \Delta E'_q \quad (۱۲)$$

در معادلات دینامیکی سیستم قدرت لازم است تا به خطی شده ولتاژ ترمینال دسترسی داشته باشیم که برابر است با:

$$\Delta V_t = a_{12} \Delta M_2 + a_{13} \Delta V_{dc} + a_{14} \Delta E'_q + a_{15} \Delta \delta_2 + a_{16} \Delta \delta \quad (۱۳)$$

در مطالعات دینامیکی مرسوم است که از مدل درجه سوم ماشین که به مدل هفرون-فیلیپس است استفاده شود. بعضاً مدار تحریک را نیز به معادلات هفرون-فیلیپس اضافه می‌کنند. این معادلات که عملکرد دینامیکی ژنراتور سنکرون را توصیف می‌کنند، به‌صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega_0 \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} &= \frac{P_m - P_e - D \omega}{2H} \\ \dot{E}'_q &= \frac{-E_q + E_{fd}}{T'_{do}} \\ \dot{E}_{fd} &= \frac{K_A (V_{to} - V_t)}{1 + sT_A} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

δ زاویه بار، P_m توان مکانیکی اعمال شده از سمت توربین به روتور ژنراتور سنکرون، P_e توان الکتریکی تزریق شده از سمت ژنراتور به شبکه قدرت، ω تغییرات سرعت روتور، E'_q ولتاژ پشت راکتانس سنکرون، E_{fd} ولتاژ تحریک، T'_{do} ثابت زمانی گذرا، V_t اندازه ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون، V_{to} مقدار مرجع ولتاژ، K_A و T_A هم به ترتیب بهره و ثابت زمانی مدار تحریک هستند. روابط فوق توصیف کننده مدل غیرخطی ژنراتور سنکرون است و برای تحلیل دینامیکی سیستم قدرت لازم است تا عملیات خطی‌سازی این معادلات با استفاده از بسط سری تیلور انجام شود:

$$\begin{aligned} T_e &= P_e = V_{td}I_{td} + V_{tq}I_{tq}, V_{td} = x_q i_{tq}, V_{tq} = E'_q - x'_d i_{td} \\ E_q &= E'_q + (x_d - x'_d) i_{td} \\ v_t &= \sqrt{v_{td}^2 + v_{tq}^2} \end{aligned} \quad (15)$$

خطی سازی معادلات (۱۴) با در نظر گرفتن روابط (۱۵) و روابط مربوط به جریان‌های خطی شده، مدل فضای حالت سیستم را به‌دست می‌دهد:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{a_6}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{a_8}{M} & 0 & -\frac{a_7}{M} \\ \frac{sZ_{18}}{T'_{do}} & 0 & \frac{sZ_{10}}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & \frac{sZ_{16}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A a_{16}}{T_A} & 0 & -\frac{K_A a_{14}}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A a_{13}}{T_A} \\ t_{Z_{62}} & 0 & t_{Z_{61}} & 0 & t_{Z_{60}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_4}{M} & -\frac{a_5}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sZ_{15}}{T'_{do}} & \frac{sZ_{17}}{T'_{do}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_A a_{12}}{T_A} & -\frac{K_A a_{15}}{T_A} & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ t_{Z_{57}} & t_{Z_{58}} & t_{Z_{56}} & t_{Z_{59}} & t_{Z_{63}} & t_{Z_{64}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta M_2 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta P_w \\ \Delta Q_w \\ \Delta U_{pss} \end{bmatrix} \quad (16)$$

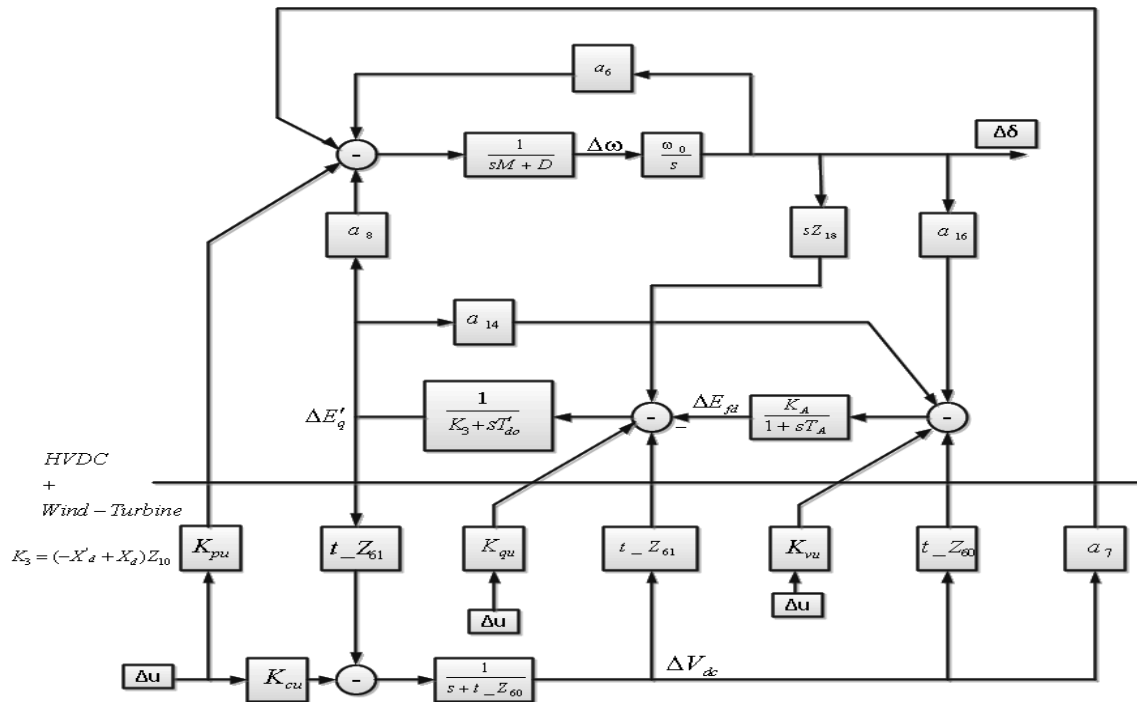
در رابطه (۱۶) ملاحظه می‌شود که متغیرهای حالت سیستم شامل تغییرات زاویه بار ($\Delta\delta$)، تغییرات سرعت روتور ($\Delta\omega$)، تغییرات ولتاژ پشت راکتانس سنکرون ($\Delta E'_q$)، تغییرات ولتاژ مدار تحریک (ΔE_{fd}) و همچنین تغییرات ولتاژ خط DC است. در ضمن ورودی‌های سیستم نیز شامل تغییرات شاخص مدولاسیون یکسوکننده (ΔM_1)، تغییرات زاویه فاز یکسوکننده ($\Delta\delta_1$)، تغییرات شاخص مدولاسیون متناوب ساز (ΔM_2)، تغییرات زاویه فاز متناوب ساز ($\Delta\delta_2$)، تغییرات توان اکتیو تزریقی توسط توربین بادی (ΔP_w)، تغییرات توان راکتیو توربین بادی (ΔQ_w) و تغییرات ورودی پایدارسازی سیستم قدرت (ΔU_{pss}) می‌باشد. معادله (۱۶) از طریق بلوک دیاگرام‌ها به صورت شکل (۲) نمایش داده می‌شود. در این شکل بردارهای K_{pu} ، K_{qu} ، K_{vu} ، K_{cu} ردیف‌های مربوط به هر یک از متغیرهای حالت در ماتریس B از فضای حالت سیستم است.

۳- انتخاب سیگنال مناسب ورودی-خروجی

مقدار مینیمم تکین یک ماتریس نه تنها مشخص کننده رنک^۵ (یا رتبه) یک ماتریس است، بلکه ابزاری برای اندازه‌گیری فاصله این ماتریس از مجموعه ماتریس‌هایی است که رنکی کمتر از این رنک را دارا هستند. این فاصله وسیله‌ای برای مقایسه توانایی هر یک از ورودی‌ها در کنترل مدهای سیستم است. در حالت کلی فضای حالت سیستم دینامیکی را می‌توان به صورت رابطه زیر معرفی نمود:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن Δ نشان دهنده تغییرات دیفرانسیلی حول یک نقطه کاری است. سیستم توصیف شده توسط رابطه (۱۷) قابل کنترل گفته می‌شود اگر برای هر حالت اولیه $x(t_0)$ ، $t_1 > 0$ و حالت نهایی x_1 ، ورودی محدود u وجود داشته باشد بطوریکه $x(t_1) = x_1$. این سیستم را مشاهده‌پذیر گوییم هرگاه برای هر $t_1 > 0$ مقدار اولیه حالت از روی مقادیر $u(t_1)$ و $y(t_1)$ مشخص شود. [۱۸]



شکل (۲): نمایش بلوک دیاگرامی سیستم تحت مطالعه
Figure (2): Block diagram of the system under study

برای اندازه‌گیری مقدار کنترل‌پذیری (مشاهده‌پذیری) یک مود از مجموعه مودهای سیستم از طریق سیگنال ورودی (خروجی) از تست PBH استفاده می‌شود [۱۹]. تست PBH برای ارزیابی رنک ماتریس‌های زیر بکار گرفته می‌شود:

$$C(\lambda_k) = [\lambda_k I - A, b_i] \quad (18)$$

$$O(\lambda_k) = [\lambda_k I - A; c_j]$$

که λ_k امین مقدار ویژه از ماتریس A می‌باشد. ماتریس I ماتریس یکه، b_i ستون ماتریس B متناظر با ورودی u و c_j ردیفی از ماتریس C متناظر با خروجی y است. مد λ_k از سیستم خطی کنترل‌پذیر است اگر ماتریس $C(\lambda_k)$ دارای رتبه کامل باشد. به‌طور مشابه مد λ_k مشاهده‌پذیر است اگر $O(\lambda_k)$ دارای رتبه کامل باشد. رتبه ماتریس‌های $C(\lambda_k)$ و $O(\lambda_k)$ را می‌توان با استفاده از مقادیر تکین آنها اندازه‌گیری نمود. مقادیر تکین یک ماتریس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_i(A) = \sqrt{\lambda_i A^H A} = \sqrt{\lambda_i A A^H} \quad (19)$$

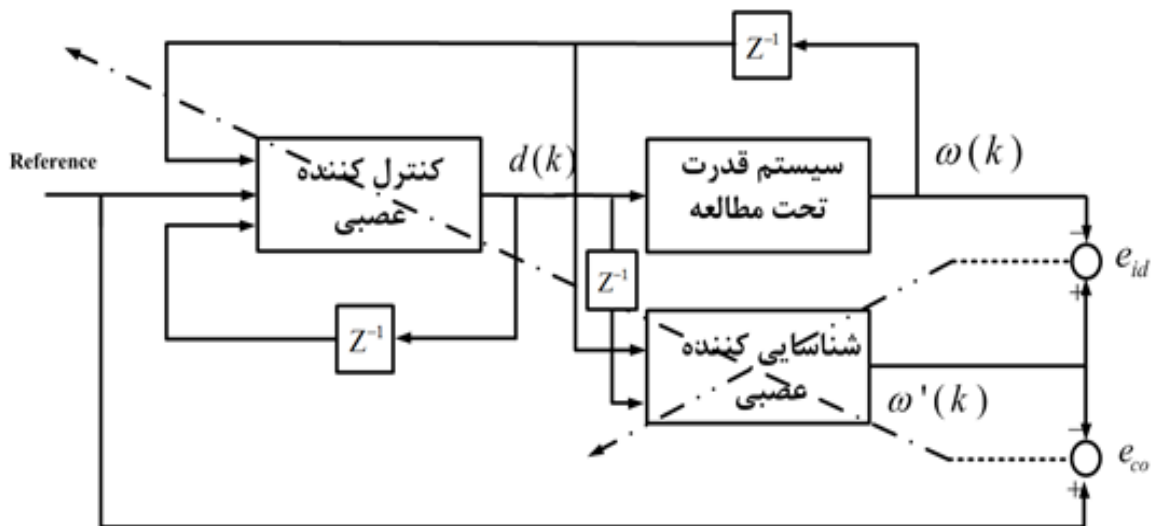
انتخاب سیگنال‌های ورودی و خروجی مبتنی بر تست PBH با انتخاب آن دسته از ورودی‌ها و خروجی‌هایی انجام می‌شود که دارای بزرگ‌ترین مقدار مینیمم تکین σ_k از ماتریس‌های $C(\lambda_k)$ و $O(\lambda_k)$ هستند. برای انتخاب سیگنال ورودی-خروجی موثر جهت طراحی کنترل‌کننده تکمیلی در سیستم قدرت تحت مطالعه از فلوجارت زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- نقطه کار سیستم بر اساس توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتورها تعیین می‌شود. در ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتورهای سنکرون و توربین بادی فرا ساحلی در مقدار حداقل خود تنظیم می‌شوند.
- ۲- حول نقطه کاری مشخص پخش بار سیستم انجام گرفته و داده‌های آن ذخیره می‌شوند.
- ۳- با استفاده از داده‌های پخش بار، مدل فضای حالت خطی شده از مدل غیرخطی سیستم استخراج می‌شود.
- ۴- ماتریس‌های A ، B ، C و D از فضای حالت سیستم به کمک رابطه (۱۶) استخراج می‌شوند.
- ۵- مدهای نوسانی سیستم با استفاده از مدل فضای حالت مشخص می‌شود.

- ۶- به‌دست آوردن مقدار تکین مینیمم ماتریس کنترل پذیر یا $C(\lambda_k) = [\lambda_k I - A, b_i]$ و مشا هده پذیری یا $O(\lambda_k) = [\lambda_k I - A; c_j]$ به ازای مد مورد نظر (مد الکترومکانیکی) و ستون‌ها و ردیف‌های متناظر برای هر ورودی (b_i) خروجی (c_j) از ماتریس‌های $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]$ و $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$
- ۷- مینیمم مقادیر تکین به ازای سیگنال‌های ورودی و خروجی انتخاب شده ترسیم می‌شوند.
- ۸- نقطه کاری اولیه (مشخص شده در گام اول) با یک گام تغییر داده شده و در صورتی که از مقدار مجاز تعیین شده برای نقطه کاری تخطی نشده بود به گام دوم بر می‌گردیم. در غیر این صورت الگوریتم به اتمام رسیده است.

۴- طراحی کنترل‌کننده تکمیلی عصبی تطبیقی

بعد از مدل‌سازی، انتخاب مناسب سیگنال ورودی-خروجی سیستم و تعیین مسیر مناسب اعمال سیگنال کنترلی در مرحله بعد لازم است تا کنترل‌کننده تکمیلی طراحی و بکار گرفته شود. در بررسی نوسانات فرکانس پایین از مدل خطی شده سیستم قدرت استفاده می‌شود. این مدل زمانی بکار برده می‌شود که هدف، بررسی عملکرد سیستم در برابر اغتشاشات کوچک باشد. مدل خطی شده سیستم قدرت در هنگام بروز اغتشاشات بزرگ، مناسب نبوده و چه بسا کنترل‌کننده‌های طراحی شده بر اساس این مدل نیز عملکرد مناسبی را برای مدل غیرخطی نداشته باشند. بنابراین در این مقاله استفاده از یک سیستم کنترلی شبکه عصبی تطبیقی جهت میراسازی نوسانات در سیستم غیرخطی پیشنهاد می‌شود که در شکل (۳) نشان داده شده است. در ادامه نحوه طراحی این سیستم کنترلی شرح داده می‌شود.



شکل (۳): سیستم کنترلی شبکه عصبی تطبیقی پیشنهادی برای سیستم قدرت
Figure (3): Proposed adaptive neural network control system for power system

امروزه کنترل‌کننده‌های هوشمند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و طراحان به دنبال استراتژی ساده و سریع جهت آموزش این کنترل‌کننده‌ها هستند. البته انتخاب نحوه آموزش کنترل‌کننده به شناخت ما از سیستم بستگی دارد. جهت آموزش کنترل‌کننده‌های عصبی چهار لم وجود دارد [۲۹]. یکی از لم‌های آموزشی جهت آموزش کنترل‌کننده‌های عصبی Through Model (T.M.L) است که به جهت مزیت سرعت بالای این لم نسبت به دیگر لم‌ها، در این مقاله از این لم جهت آموزش کنترل‌کننده عصبی استفاده می‌شود. در این لم اطلاعات لازم برای آموزش کنترل‌کننده، از میان مدل سیستم (شناسایی‌کننده) به کنترل‌کننده داده می‌شود.

برای آموزش ساختار عصبی کنترل‌کننده، در هر گام آموزش لازم است تغییرات پارامترهای آن (وزن‌ها) جهت کمینه‌سازی تابع معیار محاسبه شود. در استراتژی T.M.L قبل از انجام دوره آموزشی بلوک کنترل‌کننده، لازم است سیستم بطور کامل شناسایی

شود. برای این منظور از ساختار شبکه عصبی دیگری به نام شناسایی کننده عصبی استفاده شده است. بعد از یکسان شدن رفتار مدل شبکه شناسایی کننده عصبی با رفتار سیستم اصلی داریم:

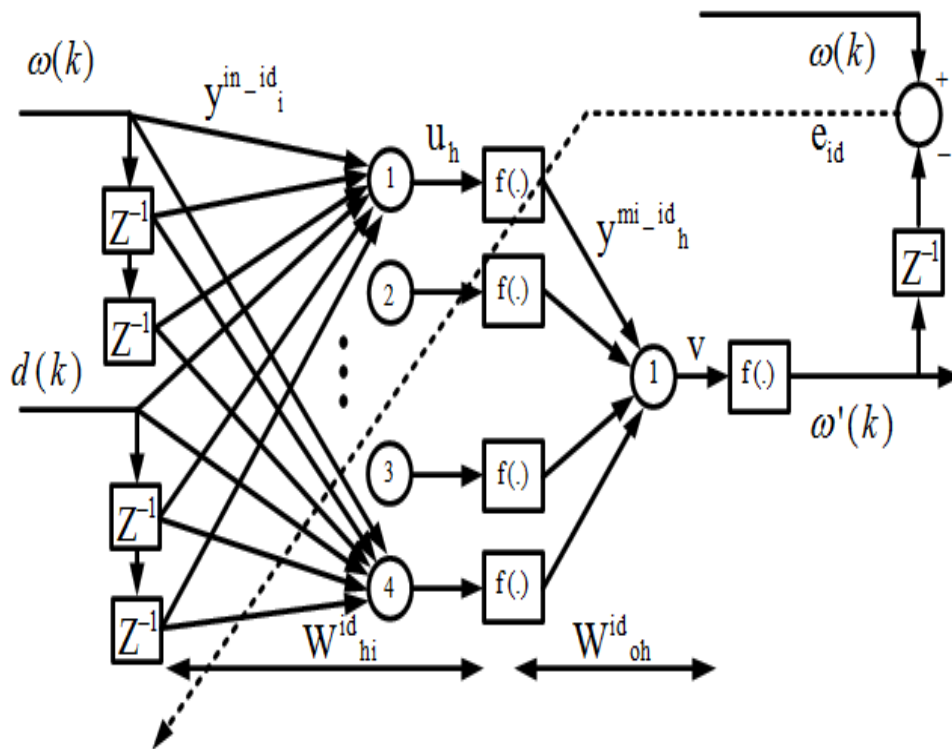
$$\omega(k) = \hat{\omega}(k) \quad (20)$$

بعد از این مرحله می توان کنترل کننده عصبی را با تابع معیار زیر آموزش داد (ω_{ref} مقدار مرجع، ω خروجی سیستم واقعی، ω' خروجی شناسایی کننده عصبی است):

$$J = \frac{1}{2}(\omega_{ref} - \omega) = \frac{1}{2}(\omega_{ref} - \hat{\omega}) \quad (21)$$

۴-۱- آموزش شبکه عصبی شناسایی کننده

در شکل (۴) ساختار تشکیل دهنده شناسایی کننده عصبی نمایش داده شده است. خروجی این شبکه به ۳ خروجی کنترل کننده $U_c(k), U_c(k-1), U_c(k-2)$ و خروجی سیستم اصلی $\Delta\omega(k), \Delta\omega(k-1), \Delta\omega(k-2)$ در زمان های قبلی بستگی دارد. همان طور که در این شکل مشخص است، این شبکه یک شبکه پیشرو بوده و دارای ۴ نرون در لایه مخفی و یک نرون در لایه خروجی است.



شکل (۴): ساختار پیشنهادی برای شناسایی کننده عصبی

Figure (4): Proposed structure for neural identifier

U_c خروجی کنترل کننده است. تابع مشخصه (f) برای شبکه عصبی شناسایی کننده تانژانت هیپربولیک است. منظور از $\Delta\omega$ خروجی سیستم است که باید از طریق معیار ارائه شده در بخش قبلی انتخاب گردد. $\hat{\Delta\omega}$ خروجی شناسایی کننده سیستم (تخمین $\Delta\omega$) بوده و خطایی که با آن شبکه عصبی شناسایی کننده آموزش داده می شود برابر است با:

$$E_{id} = \frac{1}{2}(\Delta\omega - \hat{\Delta\omega})^2 = \frac{1}{2}e_{id}^2 \quad (22)$$

شبکه عصبی شناسایی کننده آموزش می بیند تا خطای تعریف شده در رابطه (۲۲) کاهش یابد. بنابراین:

$$\frac{\partial E_{id}}{\partial(\hat{\Delta\omega})} = -(\Delta\omega - \hat{\Delta\omega}) = -e_{id} \quad (23)$$

برای لایه خروجی شناسایی کننده عصبی می توان نوشت:

$$\frac{\partial E_{id}}{\partial W_{oh}^{id}} = \frac{\partial E_{id}}{\partial e_{id}} \frac{\partial e_{id}}{\partial(\hat{\Delta\omega})} \frac{\partial(\hat{\Delta\omega})}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial W_{oh}^{id}} \quad (24)$$

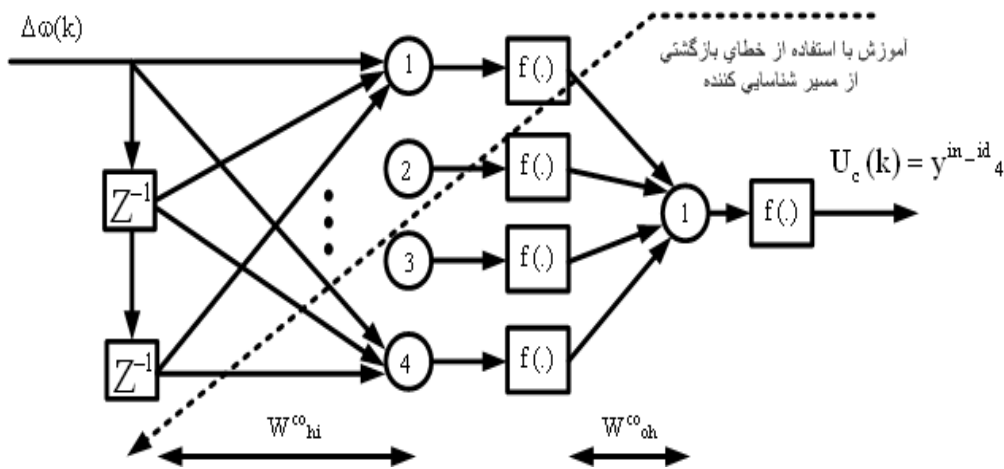
در این رابطه W_{oh}^{id} نشان دهنده وزن‌های بین نرون‌های لایه خروجی و لایه میانی و v نیز خروجی هر نرون است. با استفاده از این رابطه می‌توان ضریب حساسیت نرون خروجی را محاسبه نمود. لذا برای تصحیح وزن‌ها می‌توان نوشت:

$$W_{ohNew}^{id} = W_{ohOld}^{id} - \eta \frac{\partial E_{id}}{\partial W_{oh}^{id}} \quad (25)$$

۲-۴ آموزش شبکه عصبی کنترل کننده

در شکل (۵) ساختار کنترل کننده عصبی نشان داده شده است. این شبکه یک شبکه پیشرو با ۴ نرون در لایه میانی بوده و تابع مشخصه آن نیز تانژانت هیپربولیک انتخاب شده است. برای آموزش کنترل کننده می‌بایست از شناسایی کننده استفاده نمود، به عبارتی این شبکه از خطای بازگشتی سمت شناسایی کننده (e_{co}) آموزش می‌بیند. بنابراین خطا بصورت رابطه (۲۶) تعریف می‌شود:

$$E_{co} = \frac{1}{2} (\Delta\omega_{ref}(k) - \hat{\Delta\omega})^2 \quad (26)$$



شکل (۵): ساختار پیشنهادی برای کنترل کننده عصبی

Figure (5): Proposed structure for neural controller

دقت شود که اگر هدف پایداری فرکانس سیستم باشد باید خطای فرکانس و تغییرات آن در هنگام بروز اغتشاشات صفر باشد. یعنی مقدار مرجع برای مقایسه تغییرات همان صفر خواهد بود. لذا می‌توان نوشت:

$$E_{co} = \frac{1}{2} (0 - \hat{\Delta\omega})^2 = \frac{1}{2} \hat{\Delta\omega}^2 = \frac{1}{2} e_{co}^2 \quad (27)$$

مشتق‌گیری از این رابطه نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\partial E_{co}}{\partial(\Delta\omega)} = \hat{\Delta\omega} = -e_{co} \quad (28)$$

بنابراین برای پیدا کردن ضریب حساسیت نرون های لایه خروجی کنترل کننده می توان نوشت:

$$\frac{\partial E_{co}}{\partial W^{co}_{oh}} = \frac{\partial E_{co}}{\partial e_{co}} \frac{\partial e_{co}}{\partial(\Delta\omega)} \frac{\partial(\Delta\omega)}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial W^{co}_{oh}} \quad (29)$$

که در این رابطه v خروجی مربوط به نرون خارجی شناسایی کننده و W^{co}_{oh} وزن های مربوط به لایه خروجی کنترل کننده شبکه عصبی است. برای این خروجی می توان نوشت:

$$v = \sum_h W^{id}_{oh} y^{mi-id}_h$$

$$y^{mi-id}_h = f\left(\sum_i W^{id}_{hi} y^{in-id}_i\right) = f(u_h) \quad (30)$$

در این رابطه y^{in-id}_i ورودی ها، y^{mi-id}_h ورودی های لایه خروجی، W^{id}_{hi} وزن های ارتباطی بین ورودی ها و لایه میانی، W^{id}_{oh} وزن های ارتباطی بین لایه مخفی و خروجی، i تعداد ورودی ها و h تعداد نرون لایه میانی شبکه عصبی شناسایی کننده هستند. ورودی چهارم این شبکه ورودی حال حاضر کنترل کننده است یعنی $y^{in-id}_4 = U_c$. از طرفی با استفاده از قاعده زنجیره ای مشتق خواهیم داشت:

$$\frac{\partial v}{\partial W^{co}_{oh}} = \frac{\partial v}{\partial U_c} \frac{\partial U_c}{\partial W^{co}_{oh}} = \frac{\partial v}{\partial y^{mi-id}_h} \frac{\partial y^{mi-id}_h}{\partial U_c} \frac{\partial U_c}{\partial W^{co}_{oh}} \quad (31)$$

و لذا با استفاده از روابط (29) تا (31) می توان ضریب حساسیت برای نرون خروجی (و در ادامه آن ضریب حساسیت نرون های لایه میانی) را محاسبه نموده و وزن های کنترل کننده شبکه عصبی را تصحیح نمود. باید توجه داشت که کنترل کننده شبکه عصبی از مسیر شناسایی کننده آموزش داده می شود و در حین آموزش کنترل کننده، وزن های مربوط به شناسایی کننده در جهت کاهش خطای (22) تغییر می کند. در واقع هدف از بکار بردن شناسایی کننده محاسبه خطا در نرون خروجی کنترل کننده است (بجای استفاده از خروجی سیستم واقعی و محاسبه خطا از روی آن) تا با استفاده از آن بتوان آموزش کنترل کننده را تکمیل نمود.

در T.M.L ابتدا در یک فاصله زمانی کوتاه، کنترل کننده آموزش نیافته به مانند شکل (3) به سیستم سیگنال اعمال می کند. لازم به یادآوری است که در این شکل، e_{id} مقدار خطا جهت آموزش شناسایی کننده و e_{co} مقدار خطا جهت آموزش کنترل کننده عصبی است. از اطلاعات عددی ورودی-خروجی بدست آمده از سیستم در این زمان جهت آموزش ساختار عصبی شناسایی کننده استفاده می شود و این ساختار تا آنجا آموزش می یابد که رفتار سیستم را در این محدوده زمانی و در حد مطلوب دنبال کند. لذا با این عمل به دلیل مقطعی بودن شناسایی کننده، سرعت انجام این مرحله بسیار بالا می رود. کنترل کننده شبکه عصبی نیز از طریق شبکه عصبی شناسایی کننده آموزش می بیند.

۵- شبیه سازی

در این بخش شبیه سازی سیستم تحت مطالعه (1) با استفاده از نرم افزار متلب انجام خواهد شد. در این راستا ابتدا کولپینگ مناسب بین سیگنال های ورودی و خروجی انتخاب می شود. سپس کنترل کننده میراساز طراحی و همراه سیستم شبیه سازی می شود. جهت نمایش موثر بودن استراتژی کنترلی به همراه کنترل کننده عصبی، نتایج با پاسخ های حاصل از بکارگیری یک کنترل کننده پیشفاز-پسفاز مقایسه خواهند شد.

برای سیستم قدرت تحت مطالعه بر اساس جدول (۱) شرایط کاری در نظر گرفته می‌شود. شرایط کاری به دو صورت نرمال و سنگین در نظر گرفته شده است تا عملکرد مناسب کنترل‌کننده عصبی پیشنهادی برای هر دو حالت بررسی شود. لازم به ذکر است که کنترل‌کننده در شرایط کاری نرمال طراحی می‌شود. در هر یک از نقاط کاری ابتدا پخش باری صورت می‌گیرد و مولفه‌های ولتاژ و جریان همه گره‌ها و شاخه‌های سیستم محاسبه می‌شود. سپس بر اساس این مقادیر، سیستم غیرخطی، خطی‌سازی شده و فضای حالت سیستم به دست خواهد آمد.

Table (1): Working conditions defined for the power system under study
جدول (۱): شرایط کاری تعریف شده برای سیستم قدرت تحت مطالعه

شرایط کاری	V_t	P_e	Q_e	P_{Wt}	Q_{Wt}
(Normal) γ_1	۱	۱	۰/۱	۰/۹	۰
(Heavy) γ_2	۱	۱/۲	۰/۴	۱/۲	۰/۴

۵-۱- انتخاب کولپینگ مناسب ورودی-خروجی

در سیستم چند متغیره یکی از مهم‌ترین گام‌ها برای طراحی کنترل‌کننده انتخاب مسیر مناسب بین سیگنال‌های ورودی-خروجی است که در آن کنترل‌کننده فعالیت خواهد کرد. متغیرهای حالت سیستم شامل $\Delta\omega$ ، $\Delta\delta$ ، $\Delta\omega$ ، $\Delta E'_q$ ، $\Delta E'_{fd}$ و ΔV_{dc} و ورودی‌های سیستم شامل ΔM_1 ، $\Delta\delta_1$ ، ΔM_2 ، $\Delta\delta_2$ ، ΔP_w ، ΔQ_w و ΔU_{pss} هستند. برای تعریف سیگنال خروجی به صورت زیر عمل می‌شود. در بسیاری از تحقیقات برای طراحی کنترل‌کننده تکمیلی معمولاً از تغییرات سرعت روتور در ژنراتور سنکرون بازخورد گرفته می‌شود. چرا که هر گونه تغییر در فرکانس سیستم خود را در تغییرات سرعت روتور نمایش خواهد داد. تغییرات زاویه بار نیز گزینه مرتبط با تغییرات سرعت روتور است. در این تحقیق هر دو مولفه مذکور بعنوان خروجی در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که هر دو مولفه در عمل قابل اندازه‌گیری دقیق (با استفاده از سرعت سنج و یا تخمین حالت) هستند. از سویی دیگر مساله مورد نظر در این مقاله تاثیر گذاری مزرعه بادی بر مود نوسانی است. در بخش ۲ توربین بادی بعنوان یک بار منفی که امکان تبادل توان اکتیو و راکتیو را دارد، مدل‌سازی شد. با این حال ولتاژ ترمینال توربین بادی می‌تواند مستقیماً بر روی چگونگی تبادل توان از طریق سیستم انتقال VSC HVDC موثر باشد. بنابراین مناسب است تا در توربین بادی، مولفه ولتاژ ترمینال نیز بعنوان خروجی در نظر گرفته شود تا مقدار مشاهده‌پذیری مودنوسانی از این طریق بررسی گردد. بنابراین متغیرهای تغییرات سرعت روتور، تغییرات زاویه بار روتور در ژنراتور سنکرون و ولتاژ ترمینال در مزرعه بادی بعنوان خروجی‌های سیستم تعریف می‌شوند. در چنین شرایطی برای مقادیر مختلف توان تبدلی توربین بادی و به ازای تغییرات توان اکتیو در ژنراتور سنکرون نتایج کنترل-پذیری و مشاهده‌پذیری مود نوسانی در شکل‌های (۶) الی (۹) نمایش داده شده است.

از شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان موارد زیر را استخراج نمود:

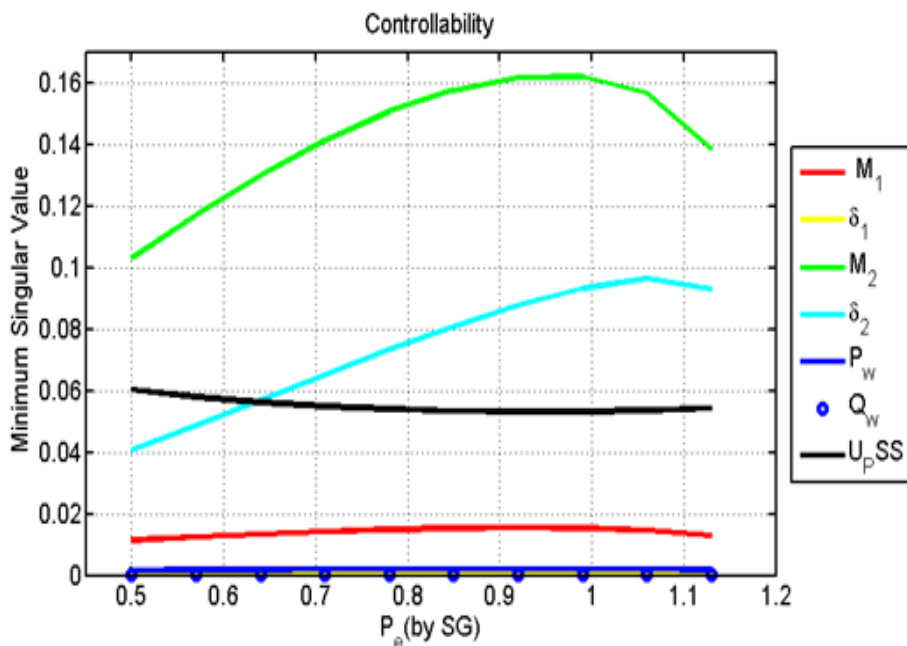
۱- کنترل‌پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌های مبدل اینورتری که به ماشین سنکرون نزدیکتر است، نسبت به سایر ورودی‌ها بیشتر است.

۲- در بین ورودی‌های اینورتر کنترل‌پذیری مود نوسانی از طریق ΔM_2 نسبت به ورودی $\Delta\delta_2$ بیشتر است.

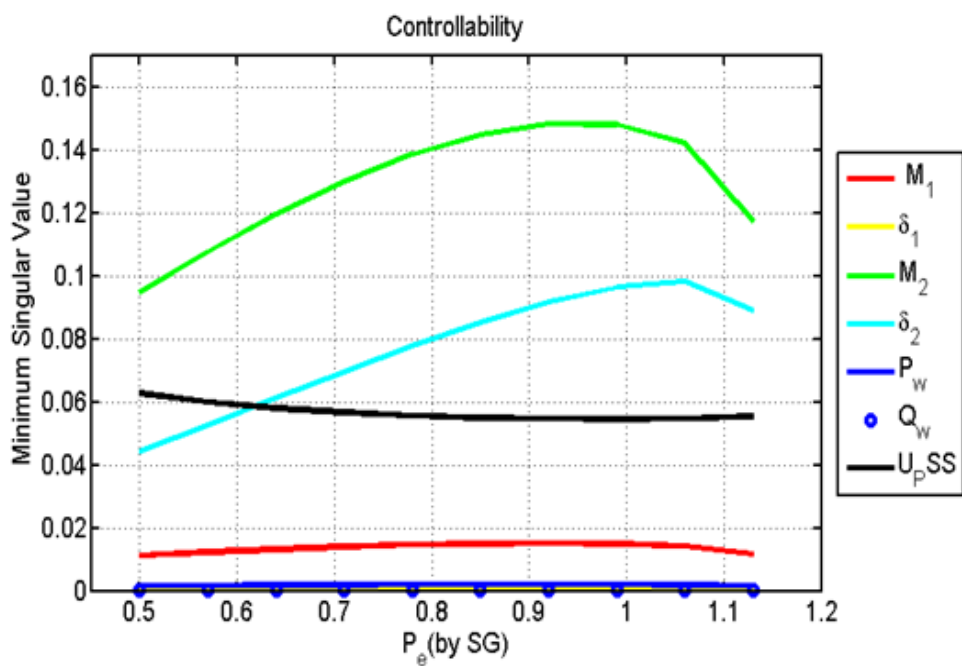
۳- بعد از دو ورودی مربوط به اینورتر، کنترل‌پذیری مود نوسانی سیستم از طریق ورودی پایدارسازی سیستم قدرت^۷ یا همان PSS نسبت به سایر ورودی‌ها بیشتر است.

۴- کنترل‌پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌های یکسوکننده که به ماشین القایی نزدیکتر است، ناچیز بوده و البته ترتیب تاثیر گذاری این ورودی‌ها مشابه ترتیب اثر گذاری ورودی‌های اینورتر است.

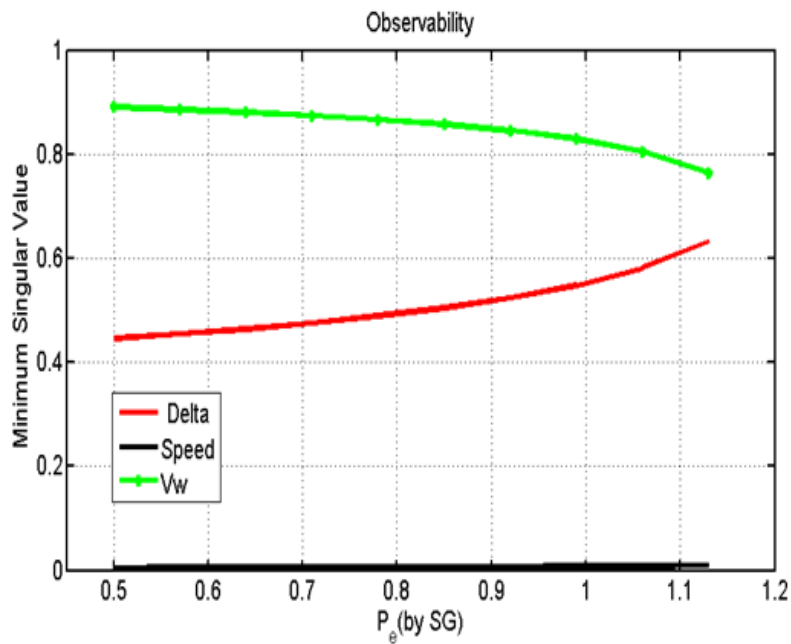
۵- ورودی‌های توربین بادی نظیر توان اکتیو و راکتیو کنترل‌پذیری کم و ناچیز (در حدود صفر) را ارائه می‌کنند. بدین معنا که تاثیر گذاری توربین بادی بر امر بهبود پایداری سیستم قدرت در صورت لحاظ نشدن سیستم VSC HVDC ناچیز است. بنابراین از دیدگاه کنترلی بهترین ورودی برای اعمال سیگنال کنترل تکمیلی پایدارساز اندیس مدولاسیون مربوط به سیستم VSC HVDC است. در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده پذیری مود نوسانی در خروجی‌های سیستم نمایش داده شده است.



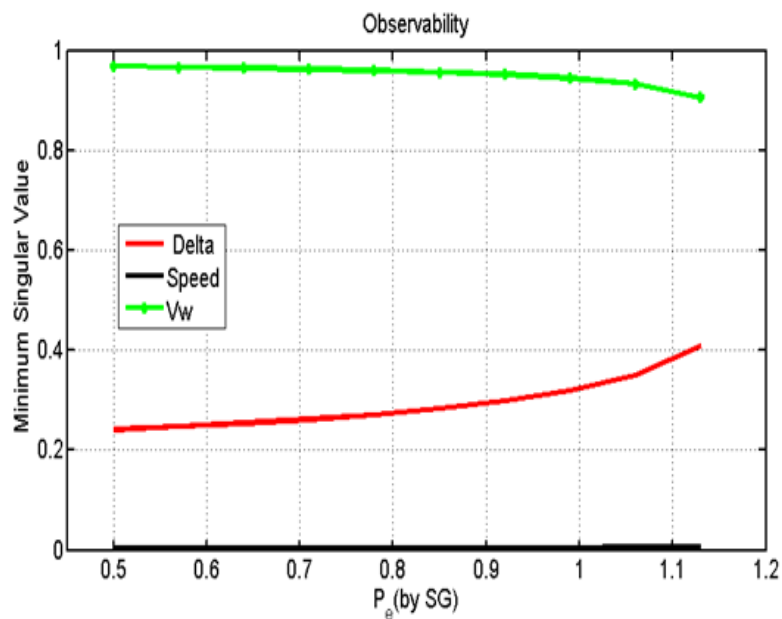
شکل (۶): نتیجه کنترل پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌ها برای شرایط کاری نرمال توربین بادی
Figure (6): Result of oscillation mode controllability via inputs for normal wind turbine operating conditions



شکل (۷): نتیجه کنترل پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌ها برای شرایط کاری سنگین توربین بادی
Figure (7): Result of oscillation mode controllability through inlets for heavy wind turbine operating conditions



شکل (۸): نتیجه مشاهده پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌ها برای شرایط کاری نرمال توربین بادی
 Figure (8): Result of oscillation mode visibility through inputs for normal wind turbine operating conditions



شکل (۹): نتیجه مشاهده پذیری مود نوسانی از طریق ورودی‌ها برای شرایط کاری سنگین توربین بادی
 Figure (9): Result of oscillation mode visibility through the inlets for heavy wind turbine operating conditions

از شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان موارد زیر را استخراج نمود:

- ۱- مشاهده‌پذیری مود نوسانی سیستم از طریق ولتاژ ترمینال توربین بادی نسبت به سایر خروجی‌ها بیشتر است. به عبارت دیگر می‌توان از این متغیر بعنوان سیگنال مناسب در مسیر بازخورد استفاده کنیم.
- ۲- مشاهده‌پذیری مود نوسانی از طریق تغییرات سرعت روتور حداقل مقدار را دارا است. به عبارت دیگر این متغیر نمی‌تواند گزینه مناسبی برای طراحی کنترل کننده محسوب شود.

۳- تغییرات زاویه بار روتور بعد از تغییرات ولتاژ باس خروجی توربین بادی گزینه مناسبی برای گرفتن بازخورد محسوب می شود. با این حال اندازه‌گیری این متغیر دشوار است و بنابراین بهترین گزینه می‌تواند همان تغییرات ولتاژ ترمینال محسوب شود.

بنابراین بهترین مسیر برای طراحی کنترل‌کننده تکمیلی میراساز مسیر بین ورودی ΔM_2 و خروجی ΔV_w است.

۲-۵- پاسخ سیستم به ازای بکارگیری کنترل‌کننده های تکمیلی

ابتدا کنترل‌کننده عصبی با استفاده از سیستم خطی و مطابق بخش ۴، طراحی می‌شود. شبکه عصبی شناسایی‌کننده دارای ۴ نرون میانی و ۶ ورودی و شبکه عصبی کنترل‌کننده دارای ۴ نرون میانی و ۴ ورودی است. ضریب یادگیری برای هر دو شبکه ۰/۹ در نظر گرفته شده است. تابع فعال‌سازی در نرون‌ها، تابع تانژانت سیگموئید است. زمان نمونه‌برداری برای ورودی‌های بازگشتی در هر دو شبکه ۰/۱ میلی ثانیه تنظیم شده است.

اغتشاشات وارد شده به سیستم مطابق با جدول (۲) اعمال می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اغتشاش‌های تعریف شده با ترکیب‌بندی نیروگاه بادی فراساحلی در ارتباط است. در بین ورودی‌های سیستم VSC HVDC می‌توان یک مورد را به دلخواه انتخاب نمود. هدف این است که اگر اختلالی در مسیر انتقال توان مزرعه بادی به شبکه اصلی رخ دهد، آیا کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند به عملکرد صحیح خود ادامه دهد یا خیر. بنابراین نوع ورودی از سیستم VSC HVDC در این حالت حائز اهمیت نخواهد بود.

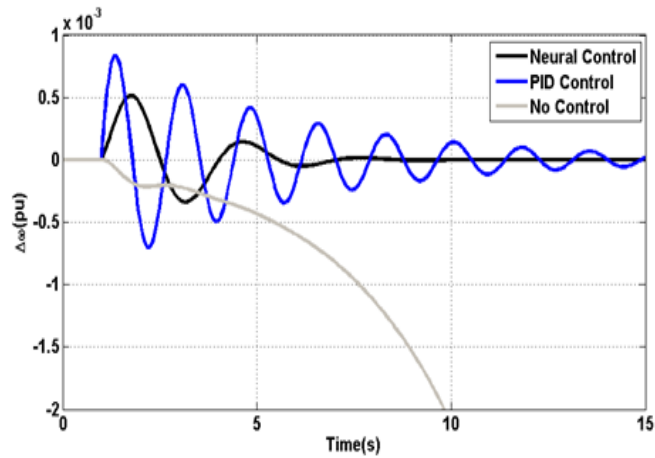
Table 2: Simulation scenarios based on the perturbation entered into the system

جدول (۲): سناریوهای شبیه‌سازی بر اساس اغتشاش وارد شده به سیستم

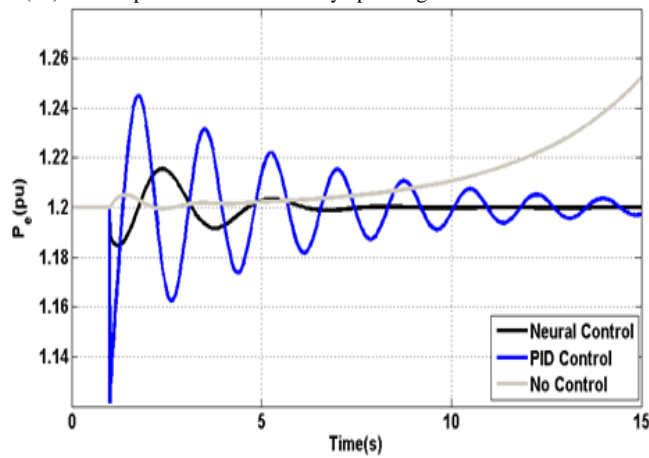
تعریف سناریوی شبیه‌سازی			
شماره سناریو	دامنه اغتشاش	زمان	اغتشاش
۱	$\Delta P_w = 0.05pu$	$t = 1s$	تغییرات توان اکتیو در توربین بادی
۲	$\Delta V_w = 0.05pu$	$t = 1s$	تغییر ولتاژ توربین بادی

سناریوی اول (اغتشاش در توان اکتیو توربین بادی)

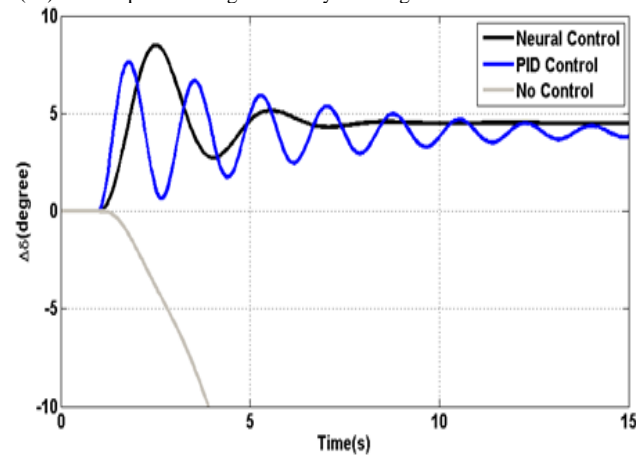
در این حالت پاسخ سیستم در شکل‌های (۱۰) الی (۱۳) نمایش داده شده است. این شکل‌های شامل تغییرات زاویه بار، ولتاژ ترمینال توربین بادی و تغییرات توان اکتیو ژنراتور سنکرون هستند. در شکل (۱۰) تغییرات سرعت روتور نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در حالت بدون کنترل سیستم ناپایدار است با این حال استفاده از کنترل تکمیلی باعث پایداری سیستم (پایداری فرکانس) شده است. بویژه کنترل‌کننده عصبی پاسخ مناسب‌تری را (از منظر زمان نشست و فراجش اولیه) فراهم می‌کند. در شکل (۱۱) تغییرات توان اکتیو نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده عصبی به خوبی نوسانات را هم از لحاظ فراجش و هم زمان نشست میراسازی نموده است. سیستم بدون کنترل‌کننده ناپایدار است. شکل (۱۲) نیز تغییرات زاویه بار را نشان می‌دهد که این تغییر زاویه در ارتباط با تغییر توان اکتیو خواهد بود. در شکل (۱۳) تغییرات اندازه ولتاژ ترمینال توربین بادی نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در حضور کنترل‌کننده عصبی تغییرات ولتاژ کمتری در باس توربین بادی اعمال شده است. این در حالی است که سیستم بدون استفاده از کنترل‌کننده تکمیلی ناپایدار (ناپایدار ولتاژ) است.



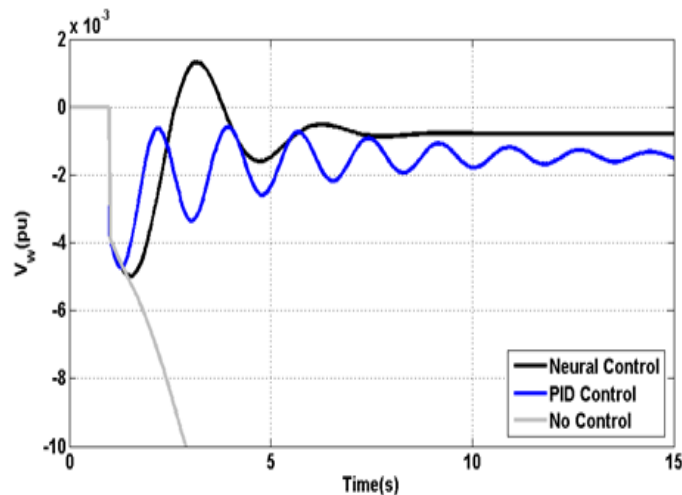
شکل (۱۰): تغییرات سرعت روتور در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی اول
Figure (10): Rotor speed variations in heavy operating conditions for the first scenario



شکل (۱۱): تغییرات توان اکتیو در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی اول
Figure (11): Active power changes in heavy working conditions for the first scenario

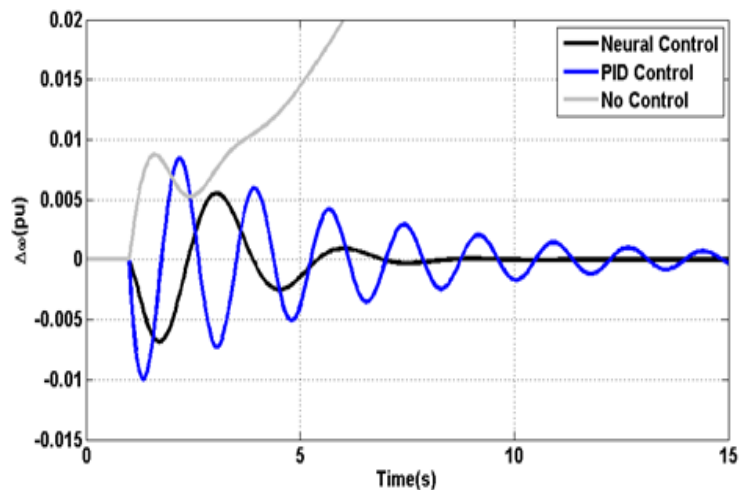


شکل (۱۲): تغییرات زاویه بار در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی اول
Figure (12): Angle changes in heavy working conditions for the first

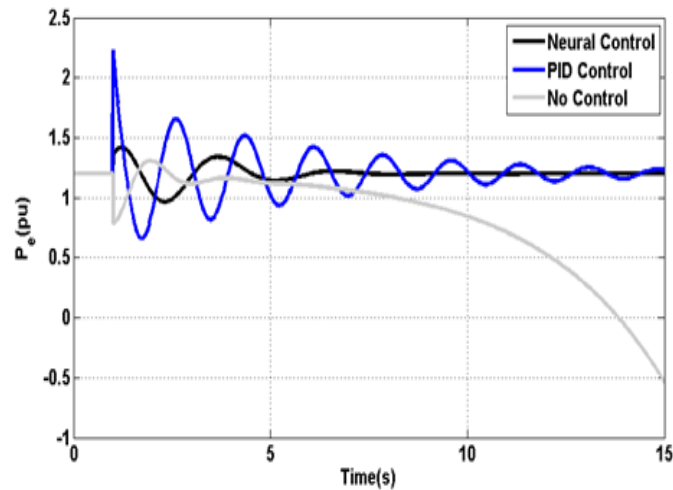


شکل (۱۳): تغییرات ولتاژ ترمینال توربین بادی برای شرایط کاری سنگین و سناریوی اول
 Figure (13): Wind turbine terminal voltage variations for heavy duty conditions and the first scenario

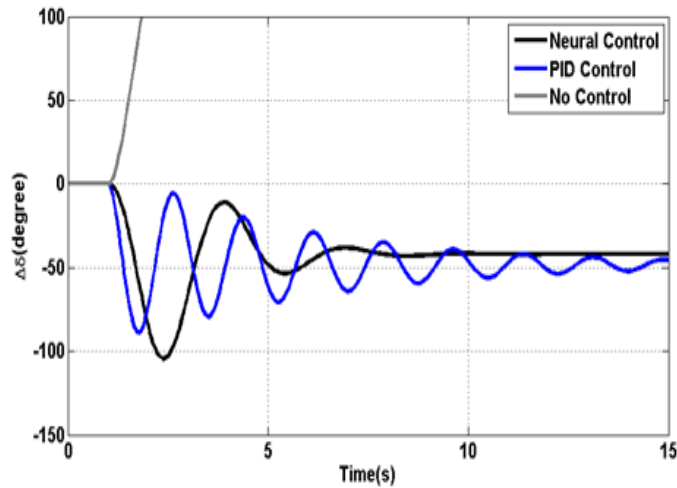
سناریوی دوم (اغتشاش در اندازه ولتاژ توربین بادی): مطابق جدول (۲) تغییری در ولتاژ ترمینال توربین بادی ایجاد می‌شود. در شکل (۱۴) تغییرات سرعت روتور نشان داده شده است. کنترل‌کننده‌های تکمیلی هر دو (هم PID و هم عصبی) به‌خوبی نوسانات بوجود آمده را میراسازی نموده‌اند. با این حال عملکرد کنترل‌کننده عصبی در زمان نشست و فراجاهش کمتر نسبت به PID^۸ مناسب‌تر است. در شکل (۱۵) تغییرهای توان اکتیو در ژنراتور سنکرون نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که نوسان توان هم میراسازی شده است. البته بر مقدار تولیدی توان اکتیو ژنراتور سنکرون چیزی اضافه نشده است. در شکل (۱۶) نوسانات زاویه بار نمایش داده شده است که بر اساس همین شکل این نوسانات در حضور کنترل‌کننده‌های تکمیلی به خوبی میراسازی شده‌اند. در شکل (۱۷) نوسانات ولتاژ ترمینال توربین بادی ترسیم شده است. این نوسانات در حالت سیستم حلقه باز سریعاً رشد کرده و سیستم را از منظر ولتاژ ناپایدار می‌کند ولی استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی به‌ویژه کنترل‌کننده عصبی بخوبی میراسازی نوسان‌ها را نتیجه داده است.



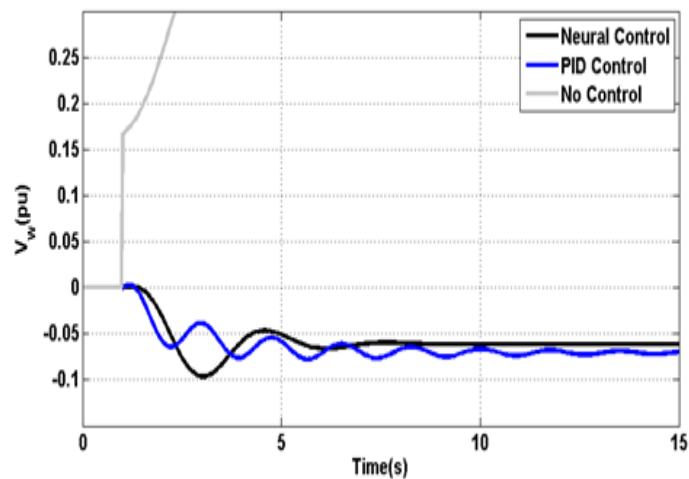
شکل (۱۴): تغییرات سرعت روتور در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی دوم
 Figure (14): Rotor speed variations in heavy operating conditions for the second scenario



شکل (۱۵): تغییرات توان اکتیو در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی دوم
 Figure (15): Active Power Changes in Heavy Working Conditions for the Second Scenario



شکل (۱۶): تغییرات زاویه بار در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی دوم
 Figure (16): Angle changes in heavy working conditions for the second scenario



شکل (۱۷): تغییرات ولتاژ ترمینال توربین بادی در شرایط کاری سنگین و برای سناریوی دوم
 Figure (17): Wind turbine terminal voltage variations for heavy duty conditions and the second scenario

۶- نتیجه‌گیری

هدف این مقاله بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به مزارع بادی فراساحلی است که انرژی تولیدی خود را از طریق خطوط انتقال VSC HVDC به شبکه اصلی منتقل می‌کنند. برای این منظور مدل‌سازی سیستم‌های VSC HVDC و در حضور ژنراتورهای سنکرون و توربین بادی بعنوان یک بار منفی انجام شد. معادلات غیرخطی سیستم قدرت شامل HVDC استخراج شده و سپس حول یک نقطه کار خطی سازی شده‌اند. به این ترتیب معادلات فضای حالت غیرخطی و خطی حاکم بر سیستم جهت بررسی پایداری دینامیکی و گذرا بدست آمده است. برای انتخاب ورودی مناسب جهت اعمال سیگنال تکمیلی میراساز، آزمون کنترل‌پذیری بر اساس تجزیه مقادیر تکین استفاده گردید. علاوه بر این کنترل‌کننده عصبی تکمیلی با هدف بهبود پایداری سیستم قدرت طراحی گردید. ملاحظه شد که بر اساس استراتژی کنترلی بهترین مسیر برای اعمال سیگنال کمکی میراساز، مسیر بین ورودی اندیس مدولاسیون اینورتر و ولتاژ ترمینال توربین بادی است. در این مسیر کنترل‌کننده‌های تکمیلی به کار گرفته شده و نوسانات ولتاژ و فرکانس بخوبی در حضور اغتشاش‌ها میراسازی شد.

References

مراجع

- [1] J. Jackson John, F. Mwasilu, J.W. Jung. "Doubly-fed induction generator based wind turbines: A comprehensive review of fault ride-through strategies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 447-467, May 2015 (doi: 10.1016/j.rser.2015.01.064).
- [2] N. Saman, A. Rabiee. "Optimal wind power generation investment, considering voltage stability of power systems", *Renewable Energy*, vol. 115, pp.308-325, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.renene.2017.08.056).
- [3] S. Ma, H. Geng, L. Liu, G. Yang, B.C. Pal, "Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol, 33.1, pp. 216-226, Jan. 2018 (doi:10.1109/TPWRS.2017.2700050).
- [4] X. Yan, Y. Min, Y. Zhao, Z. Rui. "Robust dispatch of high wind power-penetrated power systems against transient instability." *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33,1 pp. 174-186, 2018 (doi:10.1109/TPWRS.2017.2699-678).
- [5] F. Gandoman, A. Ahmadi, A. Msharaf, P. Siano, "Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 502-514, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.062>).
- [6] A. Halder, N. Pal, D. Mondal, "Transient stability analysis of a multimachine power system with TCSC controller—a zero dynamic design approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 97, pp. 51-71, April 2018 (<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.030>).
- [7] D. Atanas, S. Bolik, "Wind turbine manufacturers observation regarding reactive power support and control requirements", *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 539-544, 2017 (doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0605).
- [8] D. Devaraj, J. Preetha Roselyn, "On-line voltage stability assessment using radial basis function network model with reduced input features", *International Journal Electrical Power Energy System*, pp. 1550–51, 2011 (doi: 10.1016/j.ijepes.2011.06.008).
- [9] M. Ahmed, R. Iravani, "Enhanced generic nonlinear and linearized models of wind power plants", *IEEE Trans. on Power Systems*, 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2654346).
- [10] A. Rolán, F. Lopez, S. Bogarra, L. Monjo, "Reduced-order models of squirrel-cage induction generators for fixed-speed wind turbines under unbalanced grid conditions", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 566-577, 2016 (doi: 10.1109/TEC.2015.2504793).
- [11] J. García, C. Ugalde-Loo, F. Bianchi, O. Bellmunt, "Input–output signal selection for damping of power system oscillations using wind power plants", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 58, pp. 75–84, 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.01.001).
- [12] J. Agus, S. Suropto, R. Syahputra. "Performance evaluation of wind turbine with doubly-fed induction generator", *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, pp. 4999-5004, 2016.
- [13] C. Pradhan, C.N. Bhende. "Frequency sensitivity analysis of load damping coefficient in wind farm-integrated power system", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1016-1029, 2017 (doi:10.1109/TPWRS.2016.2566918).
- [14] S. Hashemi, M.R. Aghamohammadi, "Wavelet based feature extraction of voltage profile for online voltage stability assessment using RBF neural network", *International Journal Electrical Power Energy System*, vol. 49, pp. 86–94, July 2013 (<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.12.019>).

- [15] S. Tomonori, C. Aranya, I. Takayuki, I. Jun, "A retrofitting-based supplementary controller design for enhancing damping performance of wind power systems", arXiv preprint arXiv:1702.06695, May 2017 (doi: 10.23919/ACC.2017.7963368)
- [16] Y. Hashemi, H. Shayeghi, M. Moradzadeh. "Design of dual-dimensional controller based on multi-objective gravitational search optimization algorithm for amelioration of impact of oscillation in power generated by large-scale wind farms." *Applied Soft Computing*, vol. 53, pp. 236-261, April 2017 (doi: 10.1016/j.asoc.2016.12.036).
- [17] R. Shah, J.C. Sánchez, R. Preece, M. Barnes, "Stability and control of mixed AC-DC systems with VSC-HVDC: A review", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1140).
- [18] G. Yifei, G. Houlei, W. Qiuwei, Z. Haoran, "Enhanced voltage control of VSC-HVDC-connected offshore wind farms based on model predictive control", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 474-487, 2018 (doi:10.1109/TSTE.2017.2743005).
- [19] Y. Shen, W. Yaho, J. Wen, H. He, "Adaptive supplementary damping control of VSC-HVDC for interarea oscillation using GrHDP", *IEEE Trans. on Power Systems*, 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2720262).
- [20] K. Rakhi, C. Roy, "Modelling of UPFC (unified power flow control) to improve stability of power system by real and reactive power control of transmission line", In *Advances in Systems, Control and Automation*, pp. 647-655. Springer, Singapore, 2018 (doi: 10.1007/978-981-10-4762-6_62).
- [21] S. Peter, W. Mangalore, A. Pai, J.H. Chow, "Power system dynamics and stability: with synchrophasor measurement and power system toolbox", John Wiley and Sons, 2017.
- [22] J. Qi, J. Wang, H. Liu and A. D. Dimitrovski, "Nonlinear model reduction in power systems by balancing of empirical controllability and observability covariances". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 114-126, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2557760).
- [23] C. Guo, W. Liu, C. Zhao, X. Ni, "Small-signal dynamics and control parameters optimization of hybrid multi-infeed HVDC system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 98, pp. 409-418, 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.009>).
- [24] M. Minhaj, N. Seifipour, "Computational intelligence (Vol. II)", Iran/Tehran, Professor Hesabi Publishing Center, First Edition, February 1998 (in Persian).

زیر نویس‌ها:

1. Voltage sourced converters high voltage direct current
2. Blackout
3. High voltage direct current
4. Doubly fed induction generator
5. Rank
6. Popov-Belevitch-Hautus
7. Power system stabilizer
8. Proportional- integral-derivative