



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1402.10.1.5.8

نشریه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۱۰ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۲

صفحات ۹۸ الی ۱۱۶

ISSN: 2322-3146

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

تخمین بر خط ناپایداری گذاری ولتاژی ناحیه گسترده سیستم های قدرت با استفاده از تئوری هوشمند بیزین مبتنی بر سیگنال های سراسری

سهیل رنجبر

نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

s.ranjbar@velayat.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک روش جدید جهت آشکارسازی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده ولتاژی سیستم قدرت به کمک تئوری بیزین ارائه می شود. الگوریتم پیشنهادی روشی موثر برای طبقه بندی داده های دینامیک شبکه بوده به نحوی که برای طبقه بندی داده ها از یک سری جفت داده ها به عنوان پارامترهای ورودی-خروجی برای الگوریتم بیزین استفاده می شود. برای این منظور، با توجه به مفهوم مشاهده پذیری، سیگنال های سراسری با بالاترین نرخ دقت مشخص می شوند و به عنوان سیگنال های کاندید ورودی به رله پیشنهادی بیزین مورد ارزیابی و تست قرار می گیرند. همچنین برای آموزش رله بیزین پیشنهادی، با استفاده از تکنیک انتخاب ویژگی در محیط برون خط، ویژگی هایی با قابلیت تخمین رفتارهای دینامیکی ژنراتورهای سنکرون شناسایی شده و به عنوان ورودی به رله انتخاب می شوند. برای استخراج نتایج از یک شبکه آزمایشی استاندارد ۳۹ باسه IEEE استفاده شده و خطاها در شرایط مختلف به شبکه اعمال و پارامترهای پیشنهادی در دو زمان قبل از خطا و بعد از خطا نمونه برداری می شوند. نتایج به دست آمده نشان دهنده توانایی روش به کار رفته در یافتن تابع هدف و تشخیص یک وضعیت ناپایداری ناحیه گسترده ولتاژی است.

واژه های کلیدی

ناپایداری گذرای ولتاژی

آشکارسازی

داده کاوی

تئوری بیزین



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1402.10.1.5.8](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1402.10.1.5.8)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.10, No.1

Spring and Summer 2023

ISSN: 2322 – 3146

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

Online Estimation of the Wide Area Voltage Transient Instability Using Bayesian Technique Based on WAMS Data

Soheil Ranjbar¹

¹**Corresponding Author**, Assistant Professor, Technical and Engineering Faculty,
Electrical Engineering Department, Velayat University, Iranshahr, Iran.
s.ranjbar@velayat.ac.ir.

ABSTRACT

Keywords

Transient Voltage Instability
Estimation
Data Mining
Bayesian Theory

This paper presents a new online scheme of estimating power system transient voltage instability of interconnected synchronous generators using the intelligent Bayesian theory based on wide area signals from the WAMS data. For this purpose, by using online measurement of the system oscillatory signals gathered from the WAMS technology and developing them as a series of input-output pairs data, the system dynamic category (stable/unstable) is achieved and used for the Bayesian training. The proposed scheme is an online non-model-based technique with the ability of estimating binary decisions among the power system dynamic signals. In the case of evaluating effectiveness of the developed algorithm, by using an IEEE 39 test system, different fault events with the potential of transient voltage instabilities are investigated. In this case, considering two sampling data at pre-fault and post-fault occurrence moments, the system dynamic statuses are estimated. Results present the ability of the proposed scheme for fast and secure estimations of the system transient voltage instability.

علائم و اختصارات

| علائم | اختصارات | علائم | اختصارات |
|-------------|---|---------|---|
| $P(X)$ | احتمال مجموعه ای از داده ها در یک ویژگی | GABPNN | الگوریتم ژنتیک بر مبنای شبکه عصبی بازپخش |
| P_R | توان حقیقی | BP | الگوریتم باز پخش |
| Q_{ratio} | نرخ تغییرات توان راکتیو ژنراتور سنکرون در لحظه وقوع و برطرف شدن خطا | ANN | شبکه عصبی مصنوعی |
| Q_{fl+} | توان راکتیو در لحظه وقوع خطا | FCMC | الگوریتم گروهی میانه فاز |
| Q_{clr+} | توان راکتیو در لحظه برطرف شدن خطا | TAN | تئوری بیزین درخت تقویت شده ساده لوح |
| V_{fl+} | ولتاژ ژنراتور در لحظه وقوع خطا | E_S | مقادیر فازوری ولتاژ |
| V_{clr+} | ولتاژ ژنراتور در لحظه برطرف شدن خطا | I | مقادیر فازوری جریان |
| V_{ratio} | نرخ تغییرات ولتاژ ژنراتور سنکرون در لحظه وقوع و برطرف شدن خطا | dV/dQ | نرخ تغییرات ولتاژ به نرخ تغییرات تون راکتیو در لحظات وقوع و برطرف شدن خطا |
| VR | دامنه ولتاژ طرف گیرنده | Pe | توان الکتریکی خروجی ژنراتور |
| X | ویژگی | Pm | توان مکانیکی ورودی ژنراتور |
| Y | ویژگی | | |

۱- مقدمه

امروزه صنعت برق به عنوان یکی از بزرگ ترین سیستم های شناخته شده در جهان معرفی می شود. با توجه به گستردگی این صنعت بررسی مسائل مرتبط با آن، امری مهم بوده و نیازمند تحقیقات عمیق و گسترده است. یکی از مهم ترین انواع پایداری در سیستم های قدرت، موضوع پایداری ولتاژ می باشد. طبق تعریف، پایداری ولتاژ، به توانایی سیستم به منظور حفظ پروفیل دامنه ولتاژ در اثر بروز یک پیشامد شدید (در حد چند میلی ثانیه) اطلاق می شود. ناپایداری گذرای ولتاژی که ناشی از دادن سنکرونیسم یک ژنراتور نوعی می باشد، بیشتر در شبکه هایی رخ می دهد که در آن، اختلاف میان تولید و مصرف زیاد است به عبارتی بار در یک طرف شبکه و تولید در طرف دیگر شبکه متمرکز شده اند. افزایش بار و تغییر آرایش سیستم به دلیل بروز اغتشاش دو عامل مهمی هستند که نیاز به توان راکتیو شبکه را بالا برده و در صورت عدم تامین این نیاز، سیستم دچار ناپایداری می شود [۱].

روش های مختلفی تاکنون در زمینه آشکارسازی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده پیشنهاد شده است. روش های مورد نظر شامل اندازه گیری های دامنه ولتاژ و میزان فاز جریان بار [۲]، روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک [۳]، الگوریتم ژنتیک بر مبنای شبکه عصبی بازپخش [۴]، تحلیل مدال [۵]، تکنیک رتبه بندی احتمالاتی خطوط تحت پیشامد [۶]، تکنیک شبکه عصبی مصنوعی [۷]، الگوریتم گروهی میانه فاز [۸] هستند. روش های فوق، برای حفظ پایداری ولتاژ در لحظات تغییرات ناگهانی به منظور تنظیم کنترل کننده های موجود در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته اند.

همچنین طی سه سال اخیر، روش های متنوعی مبتنی بر الگوریتم های هوشمند به منظور شناسایی وضعیت پیش بینی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده در سیستم های قدرت برخط معرفی شده است. روش هایی همانند اندازه گیری امیدانسی برای تشخیص عدم همگامی [۹]، معیار سطوح معادل برخط توانی [۱۰، ۱۱ و ۱۲]، تبدیل ویولت [۱۳]، معیار انحراف فرکانس مقادیر ولتاژی اندازه گیری شده از باس های محلی [۱۴]، معیار سطوح معادل در حوزه زمان [۱۵]، تابع انرژی مبتنی بر روش مستقیم لیاپانف [۱۶]، اندازه گیری سرعت و شتاب زاویه ای شار مغناطیسی ژنراتورها [۱۷]، الگوریتم تشخیص الگو گروه بندی K-means [۱۸]، شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم Back-Propagation [۱۹]، منطق فازی [۲۰] و درخت تصمیم [۲۱] برای پیش بینی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده در سیستم های قدرت مد نظر محققان قرار داشته است. مقایسه ای میان روش های پیشین انجام شده و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- طبقه بندی مقالات مورد بررسی

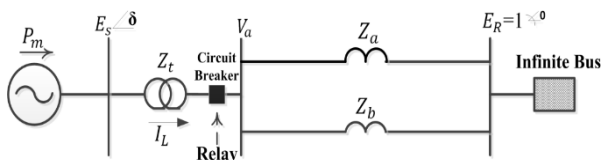
| مرجع | روش | برخط | برون خط | مبتنی بر مدل شبکه | مبتنی بر اندازه گیری | سیگنال محلی | سیگنال سراسری |
|------|--|------|---------|-------------------|----------------------|-------------|---------------|
| [۱] | ردیابی متغیرهای حالت | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۲] | دامنه ولتاژ و فاز جریان بار | - | ✓ | - | ✓ | ✓ | - |
| [۳] | ژنتیک | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| [۴] | ژنتیک بر مبنای شبکه عصبی | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۵] | تحلیل مدال | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | ✓ |
| [۶] | رتبه بندی احتمالاتی | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - |
| [۷] | شبکه عصبی مصنوعی | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | ✓- |
| [۸] | الگوریتم گروهی میانه فاز | - | ✓ | - | ✓ | ✓ | - |
| [۹] | اندازه گیری امپدانس | ✓ | - | - | - | ✓ | - |
| [۱۰] | سطوح معادل برخط توانی | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | - |
| [۱۱] | سطوح معادل برخط توانی | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | - |
| [۱۲] | سطوح معادل برخط توانی | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | - |
| [۱۳] | تبدیل ویولت | - | ✓ | - | ✓ | - | ✓ |
| [۱۴] | انحراف فرکانس | ✓ | - | ✓ | - | - | ✓ |
| [۱۵] | سطوح معادل در حوزه زمان | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۱۶] | تابع انرژی | ✓ | - | ✓ | - | - | ✓ |
| [۱۷] | سرعت و شتاب زاویه ای شار مغناطیسی ژنراتورها | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| [۱۸] | تشخیص الگو گروه بندی K-means | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۱۹] | شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم Back-Propagation | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۲۰] | منطق فازی | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |
| [۲۱] | درخت تصمیم | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - |

مطابق با جدول ۱، در مراجع اشاره شده در زمینه حفاظت ناپایداری گذرای ناحیه گسترده سیستم قدرت، نتایج نشان داده است که روش های کلاسیک دارای توانایی لازم به منظور شناسایی و عملکرد سریع تحت شرایط بحرانی نمی باشند. از طرف دیگر، روش های اشاره شده همواره متمرکز بر سطح بار ثابتی بوده اند و در صورتی که توپولوژی شبکه تغییر کند و یا شبکه آزمایشی دیگری مورد استفاده قرار گیرد، با توجه به آنکه روش مورد نظر وابسته به مدل شبکه می باشد، تحت شرایط متفاوت، کارایی لازم را نخواهد داشت.

در این مقاله، یک طرح بر خط هوشمند بیزین به منظور پیش بینی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده سیستم قدرت معرفی می شود. طرح پیشنهادی غیر مبتنی بر مدل شبکه بوده و با تمرکز بر سیگنال های سراسری اندازه گیری شده از واحدهای فازوری، معیار پایداری گذرا شبکه پیش بینی می شود. به منظور افزایش کارایی ادوات حفاظت محلی در مواقع بحرانی، طرح پیشنهادی به صورت یک سیستم کنترلی بر خط عمل نموده به نحوی که با استفاده از سیگنال های سراسری و در کسری از ثانیه معیار ناپایداری شبکه تخمین زده می شود.

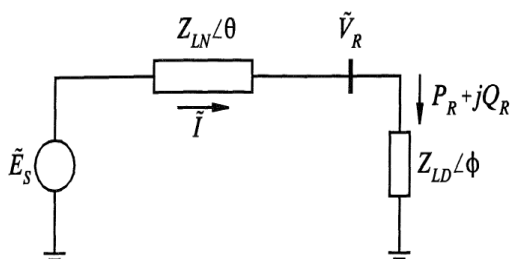
۲- مدل سازی مفهوم ناپایداری گذرای ناحیه گسترده

برای درک مفهوم پایداری گذاری ولتاژی و به منظور ارزیابی و عملکرد ادوات حفاظتی نصب شده در طول مدت یک رخداد خطا و پس از آن در یک سیستم قدرت، سیستم دو باسه نشان داده شده در شکل ۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۱- شبکه تک ماشینه باس بی نهایت [۱]

شمای مداری سیستم شکل ۱ در شکل شماره ۲، نشان داده شده است. این شبکه نمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه هایی از بارها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود.



شکل ۲- سیستم دو باسه نمونه [۲]

مطابق با شکل ۲، جریان I در شکل برابر است با [۱]:

$$I = \frac{E_s}{|Z_L| \angle \theta + |Z_D| \angle \phi} \quad (1)$$

مطابق با رابطه (۱)، E_s و I مقادیر فازوری هستند. در ادامه دامنه جریان برابر است با [۱]:

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_L \cos \theta + Z_D \cos \phi)^2 + (Z_L \sin \theta + Z_D \sin \phi)^2}} \quad (2)$$

رابطه (۲) را به صورت دیگری هم مطابق با رابطه (۳) می توان بیان کرد [۱]:

$$I = \frac{1}{\sqrt{A}} \times \frac{E_s}{Z_L} ; A = 1 + \left(\frac{Z_D}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_D}{Z_L}\right) \cos(\theta - \phi) \quad (3)$$

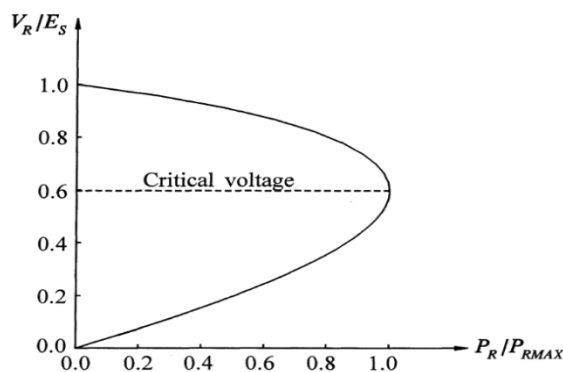
مطابق با شکل ۱، دامنه ولتاژ طرف گیرنده V_R برابر است با [۱]:

$$V_R = Z_D \cdot I = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{Z_D}{Z_L} E_s \quad (4)$$

در نهایت توان حقیقی P_R برابر است با [۱]:

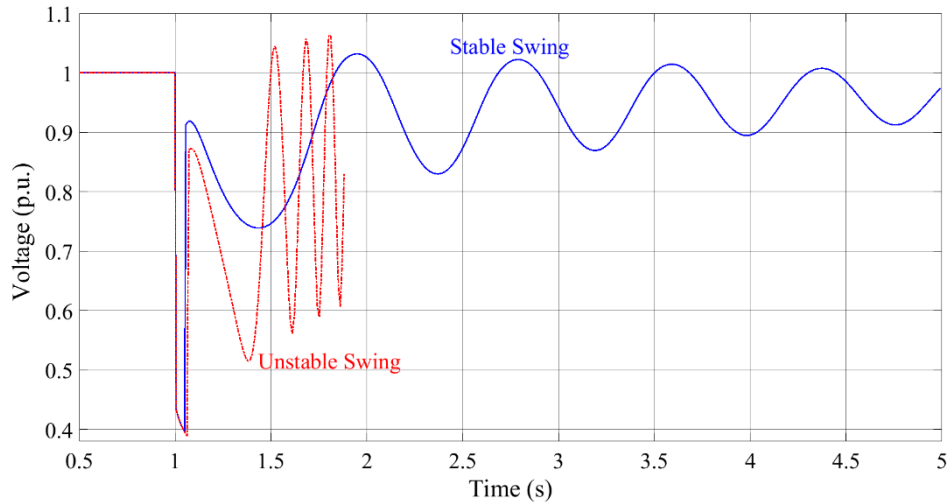
$$P_R = V_R \cdot I \cdot \cos \phi = \frac{Z_D}{A} \left[\frac{E_s}{Z_L}\right]^2 \cdot \cos \phi \quad (5)$$

باتوجه به رابطه (۵)، ضریب توان تأثیر مهمی بر مشخصه توان-ولتاژ سیستم دارد زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی می باشد. پایداری ولتاژ به روابط میان V ، P و Q وابسته می باشد. این موضوع به طور واضح تری در شکل ۳ آورده شده است. مطابق با شکل ۳، به ازای افزایش توان کشیده شده و در ادامه افزایش جریان عبوری از باس نمونه، دامنه ولتاژ باس کاهش می یابد. اگر روند افزایش توان ادامه یابد مطابق با شکل ۳، به نقطه می رسیم که از آن نقطه به بعد در ادامه کاهش ولتاژ منجر به کاهش توان عبوری می گردد. این نقطه که در شکل با عبارت (Critical Voltage) بیان شده است به مرز ناپایداری ولتاژی اطلاق می گردد و لذا می بایست قبل از رسیدن دامنه ولتاژی به این نقطه عملکردهای حفاظتی مناسب صورت پذیرد.

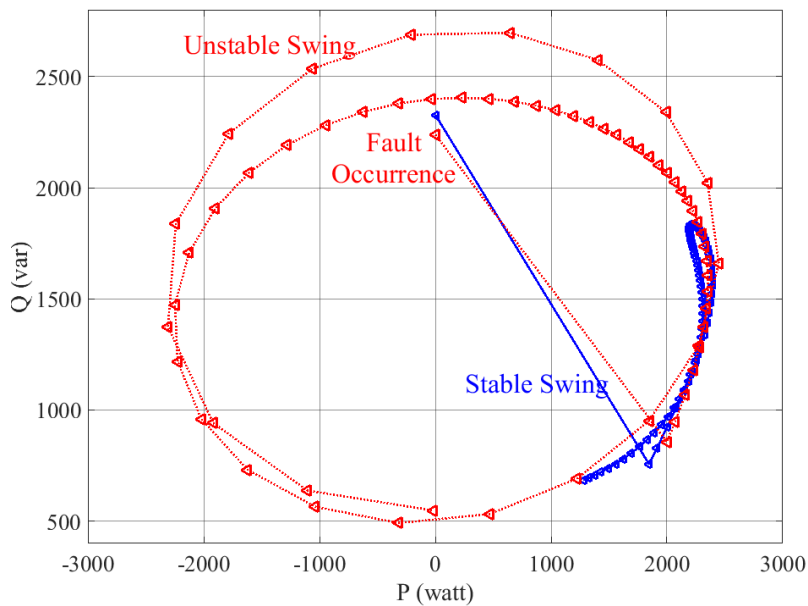


شکل ۳- مشخصه های توان-ولتاژ سیستم شکل (۱) [۲]

این موضوع را می توان به ازای وقوع یک اغتشاش در سیستم قدرت و برای دو حالت پایدار و ناپایدار نشان داد. برای این منظور، مطابق با شکل ۱، با وقوع خطای سه فاز در نزدیکی باس ژنراتوری و در ادامه برطرف شدن خطا، ژنراتور دچار نوسان می شود. نمایی از تغییرات ولتاژی و توانی برای وضعیت پایدار و ناپایدار در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- طیف تغییرات ولتاژ برای دو نمونه خطای پایدار و ناپایدار



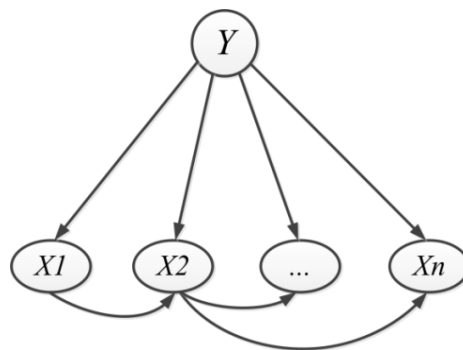
شکل ۵- طیف تغییرات توان اکتیو به توان راکتیو برای دو رخداد پایدار و ناپایدار.

مطابق با شکل های ۴ و ۵، به ازای وقوع یک خطای ناپایدار دامنه ولتاژی به شدت کاهش خواهد یافت. همچنین، طیف توان اکتیو به راکتیو کاهش محسوسی داشته و وارد ناحیه منفی می گردد که به معنای جذب توان اکتیو توسط ژنراتور و وقوع یک وضعیت ناپایدار می باشد. لذا می بایست پیش از رسیدن به این بازه، ناحیه ناپایدار بلافاصله از شبکه جدا گردد.

۳- طرح پیشنهادی بیزین به منظور پیش بینی ناپایداری گذاری ناحیه گسترده

۱-۳ تئوری بیزین

تئوری بیزین روشی برپایه احتمالات برای استنتاج کردن داده ها است. اساس این روش بر این اصل استوار است که، برای هر کمیت یک توزیع احتمال وجود دارد که با مشاهده یک داده جدید و استدلال در مورد توزیع احتمال آن، می توان تصمیم های بهینه ای اتخاذ کرد [۹]. نتایج بررسی و مشاهدات نشان داده است که کارایی این روش قابل مقایسه با درخت تصمیم و شبکه عصبی بوده است. یکی از زیر مجموعه های تئوری بیزین که روشی موثر در طبقه بندی داده ها شناخته شده است استفاده از روش تئوری TAN می باشد. این روش بر این فرض استوار است که مقادیر ویژگی ها به طور شرطی مستقل از یکدیگر هستند [۱۰]. نمایی از ساختار تئوری TAN در شکل ۶ نشان داده شده است. روش TAN به این صورت تعریف می شود: ۱- یک پیشگو کننده (متغیر) حتما یک تابع هدف به عنوان خانواده خود خواهد داشت. ۲- پیشگو کننده ها (متغیرها) می توانند توابع هدف بیشتری به عنوان خانواده خود داشته باشند.



شکل ۶- ساختار تئوری TAN [۱۹]

مطابق با شکل (۶)، در ابتدا تمام مسیرهای ممکن از تابع هدف به ویژگی ها و همچنین ویژگی ها نسبت به یکدیگر پیدا شده و متصل می شوند. سپس برای هر متغیر یک آنترابی مطابق با رابطه (۶) زیر تعریف می شود [۱۹]:

$$H(X) = - \sum_{x \in X} P(X) \cdot \log P(X) \quad (6)$$

به طوری که $P(X)$ احتمال مجموعه ای از داده ها در یک ویژگی می باشد. برای آن که بتوانیم میزان تاثیر یک ویژگی را نسبت به دیگر ویژگی ها بسنجیم از احتمال شرطی ویژگی ها نسبت به یکدیگر بهره می بریم. احتمال شرطی ویژگی X نسبت به ویژگی Y برابر است با [۱۹]:

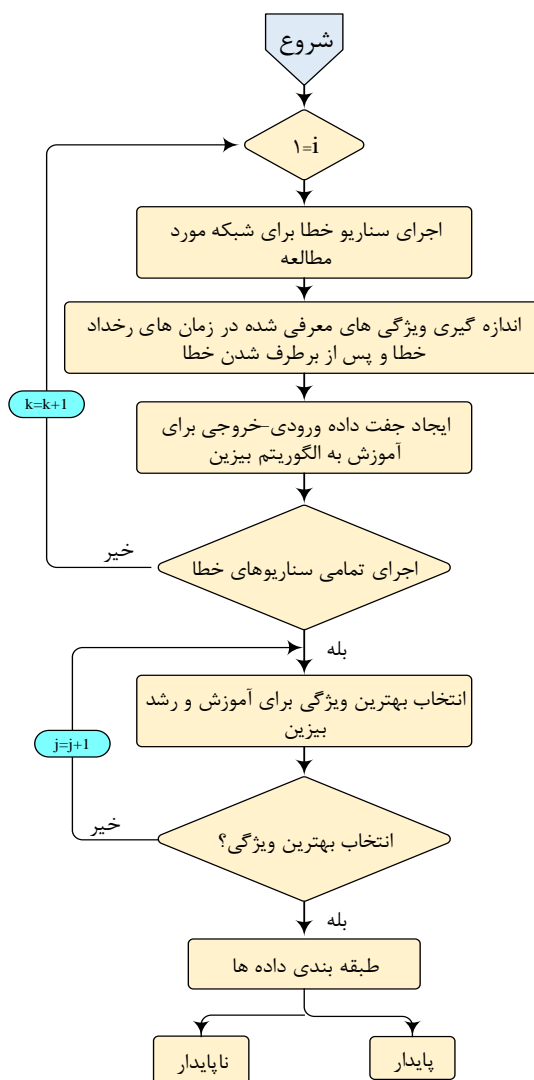
$$H(X|Y) = -\sum_{y \in Y} P(Y) \sum_{x \in X} P(X|Y) \cdot \log P(X|Y) \quad (7)$$

از روابط (۶ و ۷) میزان ضریب اتصال ویژگی ها نسبت به یکدیگر مطابق با رابطه (۸) تعریف می شود [۱۹]:

$$I(X;Y) \equiv H(X) - H(X|Y) \quad (8)$$

۳-۲ ساختار طرح پیشنهادی

ساختار طرح پیشنهادی تئوری بیزین در شکل ۷ آورده شده است. ساختار پیشنهادی از دو بخش عمده تشکیل شده است. بخش نخست مربوط به تولید نمونه ها است. مطابق با شکل ۷، در هر دوره یک سناریوی موجود در سیستم قدرت معرفی شده و بر روی شبکه مورد مطالعه انجام می شود. پس از انجام شبیه سازی با توجه به ویژگی های معرفی شده، پارامترهای مورد نظر از نتایج شبیه سازی استخراج می گردد. در ادامه و پس از تولید نمونه ها، ویژگی های معرفی شده و به عنوان یک نمونه تولید شده تحت یک سناریوی خطا در نظر گرفته می شود. این داده ها در بخش دوم برای انتخاب ویژگی های مورد نیاز و ساختن مورد استفاده قرار می گیرد. این روند تولید نمونه ها در حلقه، مکررا انجام می شود تا زمانی که آخرین سناریوی ممکن بر روی سیستم قدرت شکل گرفته و نتایج آن استخراج گردیده باشد. پس از اعمال سناریوهای خطا و تولید نمونه ها، در بخش دوم به ساخت تئوری مورد نظر پرداخته خواهد شد.



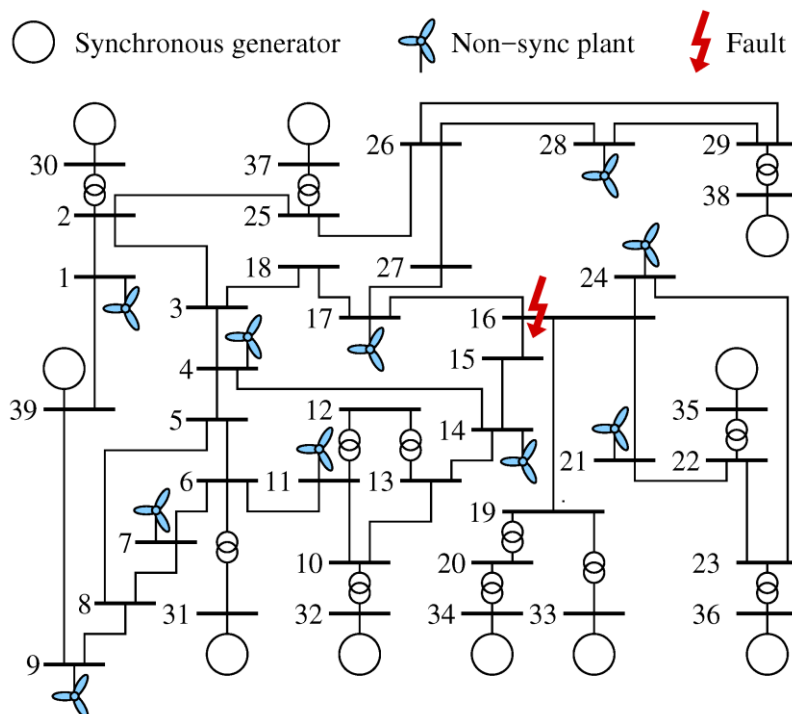
شکل ۷- فلوچارت طرح پیشنهادی تئوری بیزین.

۴- مطالعات شبیه سازی

برای بررسی و قابلیت الگوریتم ارائه شده در سیستم های قدرت، مطالعات بر روی یک شبکه ۳۹ باسه IEEE دینامیکی ۳۴۵ KV که دارای ۱۰ ژنراتور و ۱۹ بار می باشد انجام گرفته است [۲]. نمایی از شبکه مورد نظر در شکل ۸ نشان داده شده است. به منظور ارزیابی الگوریتم معرفی شده، نتایج شبیه سازی در قالب جفت داده های ورودی خروجی برای سنجش تئوری بیزین ارائه گردیده است. مطابق با شکل ۸، ژنراتور G10 به عنوان ژنراتور مبنا در نظر گرفته شده و ژنراتور G8 توسط یک رله تعیین کننده ناپایداری ولتاژ در باس ۳۷ مجهز شده است. برای تولید نمونه ها، سناریوهای خطاها در ۱۱۷ مکان متفاوت که شامل تمامی باس ها و خطوط می باشند اعمال شده و نتایج حاصل به عنوان ورودی برای الگوریتم، در نظر گرفته شده است. شبیه سازی تحت سطوح بار مختلف (۱ p.u.، ۱/۲۵ p.u. و ۱/۵ p.u.) انجام شده است که متقارن با کم باری تا وضعیت پرباری شبکه را در بر خواهد داشت.

نتایج شبیه سازی همگی از دید رله قرار گرفته در باس ۳۷ مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت و پس از خطاها در مکان های مختلف و در سطوح مختلف و با دوره های زمانی متفاوت در مجموع ۱۲۲۴ جفت داده های ورودی- خروجی از نتایج استخراج گردیده است که در این بین ۱۰۱۴ نمونه (۸۴/۸۲٪ از مجموع کل نمونه ها) مربوط به خطاهای نوع پایدار و مابقی نتایج که به تعداد ۲۱۰ نمونه (۱۶/۱۷٪ از مجموع کل نمونه ها) می باشد به عنوان خطاهای ناپایدار به عنوان داده های ورودی در نظر گرفته شده است.

تمامی شبیه سازی ها توسط نرم افزار قدرتمند DigSILENT® که یک شبیه ساز قدرتمند در تحلیل و بررسی حالت های گذرای سیستم های قدرت است انجام گرفته است. برای این منظور، از یک سیستم کامپیوتر پنج هسته ای ۳/۱ گیگاهرتز و ۸ گیگابایت رم بهره گرفته می شود. هم چنین، با توجه دروه زمانی مطالعاتی برای تمامی سناریوهای شبیه سازی برابر ۵ ثانیه در نظر گرفته می شود.



شکل ۸- شبکه آزمایش ۳۹ باسه نمونه

۱-۴ انتخاب ویژگی

برای انتخاب ویژگی به عنوان معیاری جهت آشکارسازی خطاهای پایدار و ناپایدار، پارامترهای متنوعی از شبکه را می توان در نظر گرفت، از جمله ولتاژ، توان راکتیو، توان اکتیو، توان مکانیکی، زاویه تور، فرکانس، سرعت زاویه ای و ... در این مقاله تمامی این پارامترها از دید پایداری ولتاژی مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته و در نهایت پارامترهایی که بهترین نتیجه را برای تصمیم گیری در تشخیص یک وضعیت نمونه ارائه می دهند انتخاب شدند. به منظور سنجش و مقایسه مشخصه های مختلف با یکدیگر، هشت پارامتر موثر در آشکارسازی ناپایداری ولتاژ به عنوان ویژگی های ورودی معرفی می گردند که از این میان در نهایت بهترین ویژگی ها به عنوان سنجش الگوریتم مورد نظر معرفی شده و مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این پارامترها عبارتند از؛ توان مکانیکی (P_m) ورودی ژنراتور که برابر با توان الکتریکی (P_e) خروجی ژنراتور در لحظه پیش از خطا است. پارامتر دوم ولتاژ ژنراتور در لحظه وقوع

خطا (V_{fl+}) ، پارامتر سوم ولتاژ ژنراتور در لحظه برطرف شدن خطا (V_{clr+}) ، پارامتر چهارم توان راکتیو در لحظه وقوع خطا (Q_{fl+}) ، پارامتر پنجم توان راکتیو در لحظه برطرف شدن خطا (Q_{clr+}) ، پارامتر ششم عبارت از نرخ تغییرات ولتاژ ژنراتور سنکرون در لحظه وقوع خطا و برطرف شدن خطا است که برابر است با:

$$V_{ratio} = \frac{V_{clr+}}{V_{fl+}} \quad (9)$$

پارامتر هفتم نرخ تغییرات توان راکتیو ژنراتور سنکرون در لحظه وقوع خطا و برطرف شدن و برابر است با:

$$Q_{ratio} = \frac{Q_{clr+}}{Q_{fl+}} \quad (10)$$

و در نهایت پارامتر هشتم نرخ تغییرات ولتاژ (V_{ratio}) به نرخ تغییرات توان راکتیو (Q_{ratio}) در لحظات وقوع خطا و برطرف شدن خطا که برابر است با:

$$dV / dQ = \frac{(V_{clr+} - V_{fl+})}{(Q_{clr+} - Q_{fl+})} \quad (11)$$

به منظور ارزیابی الگوریتم معرفی شده، هر ویژگی به تنهایی توسط تئوری بیزین مورد تست و مطالعه قرار گرفته و معرفی می گردد. نتایج به دست آمده از دقت های تئوری بیزین به ازای ویژگی های مختلف در جدول ۲ آورده شده است. موثرترین ویژگی در طبقه بندی داده ها، ویژگی Q_{fl+} (توان راکتیو در لحظه وقوع خطا) می باشد. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ویژگی Q_{fl+} دارای بالاترین نرخ دقت می باشد. در این قسمت ویژگی Q_{fl+} بعنوان موثرترین پارامتر با نرخ دقت (89.54%) در طبقه بندی داده ها معرفی می گردد. به منظور رسیدن به دقت بالاتر در مرحله بعد از میان ویژگی های معرفی شده در قسمت قبل، در این قسمت تئوری بیزین توسط ویژگی های مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد تا دقت ویژگی های مختلف به دست آید. پس از ارزیابی ویژگی ها این بار ویژگی ها در گروه های دو، سه تا هشت تایی با یکدیگر ترکیب شده و در هر گروه بهترین ترکیب از ویژگی ها با بهترین دقت انتخاب شده و معرفی شده است.

جدول ۲- نتایج آموزش تئوری بیزین برای گروه های مختلف به عنوان ورودی

| ویژگی | نرخ دقت بیزین (درصد) | تعداد نمونه های دسته بندی نشده |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|
| P_m | ۸۲/۸۴ | ۲۱۰ |
| V_{fl+} | ۸۷/۲۵ | ۱۵۶ |
| V_{clr+} | ۸۶/۳۶ | ۱۶۷ |
| Q_{fl+} | ۸۹/۵۴ | ۱۲۸ |
| Q_{clr+} | ۸۴/۴۸ | ۱۹۰ |
| V_{clr+}/V_{fl+} | ۸۳/۸۲ | ۱۹۸ |
| Q_{clr+}/Q_{fl+} | ۸۴/۰۸ | ۱۹۵ |
| dV/dQ | ۸۲/۷۶ | ۲۱۱ |

در نهایت از میان ویژگی های منتخب در مرحله آموزش الگوریتم و به منظور رسیدن به دقت بالاتر الگوریتم تئوری بیزین با ویژگی ها ترکیب شده و در گروه های مختلف از ویژگی های ورودی تحت آموزش و ارزیابی قرار می گیرد. بهترین دقت های به دست آمده در هر ترکیب از ویژگی های ورودی به ازای حالت های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، بهترین دقت در گروه سه و با اعمال سه پارامتر به عنوان ویژگی ورودی به دست آمده است که در بهترین حالت با ترکیب سه ورودی به نرخ دقت ۹۱.۵٪ دست یافته ایم که نرخ دقت مناسبی در طبقه بندی داده ها می باشد. در اینجا نرخ دقت به عنوان یکی از شاخصه های تئوری بیزین معرفی می گردد. با افزایش ویژگی های ورودی ممکن است میزان دقت روش استفاده شده کاهش پیدا کند.

همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است دقت الگوریتم ترکیبی با افزایش ویژگی به تدریج افزایش پیدا می کند و به نرخ دقت بالای ۹۱٪ رسیده و در ادامه با افزایش ویژگی به میزان کمی کاهش پیدا می کند.

جدول ۳- بهترین دقت های بدست آمده از بیزین در گروه های مختلف

| نرخ دقت | بهترین شرایط | گروه |
|---------|---|--------|
| ۸۹/۵۴ | Q_{fl+} | گروه ۱ |
| ۹۱/۰۱ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+})$ | گروه ۲ |
| ۹۱/۵ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr+}$ | گروه ۳ |
| ۹۱/۵ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr++} dV/dQ$ | گروه ۴ |
| ۹۱/۱۸ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr++} dV/dQ + P_m$ | گروه ۵ |
| ۹۱/۳۴ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr++} dV/dQ + P_m + Q_{clr+}/Q_{fl+}$ | گروه ۶ |
| ۹۱/۲۶ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr++} (dV/dQ) + P_m + (Q_{clr+}/Q_{fl+}) + V_{clr+}$ | گروه ۷ |
| ۹۱/۰۱ | $Q_{fl++} (V_{clr+}/V_{fl+}) + Q_{clr++} (dV/dQ) + P_m + (Q_{clr+}/Q_{fl+}) + V_{clr+} V_{fl+}$ | گروه ۸ |

۴-۲ تست الگوریتم معرفی شده

به منظور سنجش الگوریتم معرفی شده در طبقه بندی داده های از قبل پیش بینی نشده، تئوری بیزین پس از آموزش تحت تست در برابر نمونه های از قبل پیش بینی نشده قرار می گیرد. به منظور ارزیابی صحیح الگوریتم در برابر نمونه های پیش بینی نشده در این قسمت ۷۰٪ از مجموع داده ها را به عنوان نمونه های آموزشی به الگوریتم در نظر گرفته و الگوریتم را تحت آموزش قرار می دهیم در ادامه ۳۰٪ از نمونه های باقی مانده را به عنوان نمونه های از قبل پیش بینی نشده و به عنوان نمونه های تست برای الگوریتم بیزین در نظر می گیریم. در این قسمت، ترکیب های مختلف از ویژگی ها به عنوان ورودی برای آموزش و تست تئوری بیزین در نظر گرفته شده است که شامل یک ویژگی، دو ویژگی، سه ویژگی و غیره است. در نهایت هشت ویژگی متفاوت مورد ارزیابی

قرار می گیرند. نتایج جامع در مورد گروه های تشکیل شده برای دو وضعیت آموزش و تست در جدول ۴ آورده شده است. با افزایش ویژگی های بیشتر، دقت الگوریتم نیز افزایش یافته است بطوری که سطر ۲ دارای حداکثر دقت تست می باشند. طبق جدول ۴، در سطر ۲ الگوریتم بیزین به نرخ دقت ۹۰/۴۹٪ تحت نمونه های از قبل پیش بینی نشده دست یافته است و به عنوان بهترین دقت به دست آمده به عنوان ورودی در تست الگوریتم معرفی می گردد. نتیجه به دست آمده از الگوریتم، نشان دهنده دقت مناسب بیزین در شرایط مختلف خطا است. هم چنین در کنار دقت مناسب، سرعت عملکرد این الگوریتم می تواند به عنوان یکی از نقاط قوت الگوریتم معرفی شود.

جدول ۴- نتایج تئوری بیزین برای گروه های مختلف به عنوان ورودی

| گروه | تعداد نمونه های طبقه بندی نشده در مرحله تست بیزین | تعداد نمونه های طبقه بندی شده در مرحله آموزش بیزین |
|------|---|--|
| ۱ | ۴۱ (۱۱٪/۱۴) | ۸۷ (۱۰٪/۱۶) |
| ۲ | ۳۵ (۹٪/۵۱) | ۷۵ (۸٪/۷۶) |
| ۳ | ۳۷ (۱۰٪/۰۵) | ۶۹ (۸٪/۰۶) |
| ۴ | ۳۷ (۱۰٪/۰۵) | ۶۸ (۷٪/۹۴) |
| ۵ | ۳۷ (۱۰٪/۰۵) | ۷۴ (۸٪/۶۴) |
| ۶ | ۳۶ (۹٪/۷۸) | ۷۰ (۸٪/۱۸) |
| ۷ | ۳۸ (۱۰٪/۳۳) | ۶۸ (۷٪/۹۴) |
| ۸ | ۳۸ (۱۰٪/۳۳) | ۷۰ (۸٪/۱۸) |

۳-۴ مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با روش های پیشین

در این بخش، به منظور ارزیابی اثربخشی کنترل کننده پیشنهادی، یک مطالعه مقایسه ای جامع میان رویکرد پیشنهادی و چند مطالعه اخیر که در جدول ۱ خلاصه شده اند، بررسی شده است. در مورد ارزیابی نتایج مناسب، با در نظر گرفتن سناریوی خطای مشابه معرفی شده در بخش ۴-۲، رفتار دینامیکی سیستم و عملکرد میرایی کنترل کننده ها بررسی شده است. نتایج مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با روش های پیشین در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-مقایسه طرح هوشمند پیشنهادی با روش های پیشین

| مرجع | روش | شاخص میرایی (p.u.) | سیکل مورد نیاز شناسایی | مبتنی بر مدل | هزینه و پیچیدگی | قابل استفاده در شبکه های بزرگ |
|------|--|--------------------|------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|
| ۱ | ردیابی متغیرهای حالت | ۰/۵۲۳ | >۱۰ | بلی | زیاد | خیر |
| ۲ | ژنتیک بر مبنای شبکه عصبی بازپخش | ۰/۶۹۸ | ۶ | بلی | متوسط | خیر |
| ۳ | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۶۳۵ | ۷ | بلی | متوسط | خیر |
| ۴ | اندازه گیری امیدانسی | ۰/۷۲۶ | >۱۰ | بلی | متوسط | بلی |
| ۵ | معیار سطوح معادل بر خط توانی | ۰/۸۷۶ | >۱۰ | بلی | کم | بلی |
| ۶ | تبدیل و بولت | ۰/۹۱۷ | ۸ | بلی | متوسط | بلی |
| ۷ | تابع انرژی | ۰/۴۱۹ | >۱۰ | خیر | زیاد | خیر |
| ۸ | سرعت و شتاب زاویه ای شار مغناطیسی ژنراتورها | ۰/۵۱۷ | >۱۰ | بلی | زیاد | خیر |
| ۹ | تشخیص الگو گروه بندی K-means | ۱/۱۱۵ | ۹ | بلی | متوسط | خیر |
| ۱۰ | شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم Back-Propagation | ۰/۵۶۸ | ۷ | بلی | زیاد | خیر |
| ۱۱ | منطق فازی | ۱/۲۶۵ | ۵ | بلی | متوسط | بلی |
| ۱۲ | درخت تصمیم | ۱/۵۶۹ | ۴ | بلی | متوسط | بلی |
| ۱۳ | طرح پیشنهادی بیزین | ۲/۵۶۴ | ۱ | خیر | کم | بلی |

مطابق با جدول ۵، طرح هوشمند پیشنهادی نتایج بهتری را به ازای شرایط خطای یکسان به همراه دارد. مزیت اصلی طرح، سرعت عملکرد در شرایط بهره برداری مختلف شبکه و عدم وابستگی به مدل شبکه بوده است. در این حالت، هزینه و پیچیدگی روش به میزان قابل توجهی کاهش می یابد که می توان از آن در طیف گسترده ای طرح های حفاظتی بهره برد. همچنین، در مقایسه، روش های مورد اشاره نیازمند دوره زمانی بالا و با وابستگی زیاد به ماتریس امپدانس سیستم هستند. در این حالت، عملکرد کنترل کننده به شدت به شرایط بهره برداری و ساختار توپولوژیکی شبکه بستگی دارد و در صورت تغییر شرایط بهره برداری، نیازمند بروزرسانی پارامترهای کنترلی است. همچنین، از آنجایی که در طرح پیشنهادی از یک رویکرد برخط مبتنی بر سیگنال های اندازه گیری فازوری بهره گرفته شده است، می توان از آن به راحتی در سیستم های قدرت گوناگون با هزینه ها و پیچیدگی های کمتر بهره گرفت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله هدف بر ارائه روشی مناسب جهت آشکارسازی ناپایداری گذرای ولتاژی پیش از ناپایدار شدن ژنراتور شبکه قدرت بوده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد، روش معرفی شده یک تکنیک توانا و مؤثر برای آشکارسازی ناپایداری ولتاژی می باشد. برای آموزش به الگوریتم و جهت ارائه نتایج مطلوب از پنج ویژگی بهینه در آشکارسازی ناپایداری ولتاژی استفاده شد که تمامی این پارامترها در زمان های وقوع خطا و رفع خطا نمونه برداری شدند و توسط این پارامترها، تکنیک پیشنهادی بیزین توانسته به نرخ دقت مناسب با در نظر گرفتن تنها سه ویژگی دست پیدا کند.

برای رسیدن به هدف مطلوب در سیستم قدرت در زمینه پیشگویی خطاهای از قبل پیش بینی نشده قابلیت و توانایی الگوریتم در پیشگویی موارد از قبل پیش بینی نشده توسط یک سری مثال های تست مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از نمونه های تست نیز نشان داده است که روش معرفی شده، یک الگوریتم هوشمند در ارائه تصمیمات مناسب بوده و همچنین یک الگوریتم مقاوم با نرخ دقت بالا در برابر نویزهای اعمالی است. با توجه به نتایج به دست آمده و توضیحات عنوان شده، طرح پیشنهادی بیزین توانسته به خوبی در مورد نمونه های تولیدی در سیستم قدرت تصمیم مناسب را اتخاذ کند و لذا می توان از آن به عنوان یک الگوریتم مناسب در رله ها جهت آشکارسازی وضعیت های نوسان توان و ناپایداری ولتاژی در شبکه های قدرت استفاده کرد.

همچنین در ادامه این مقاله و معادلات آینده، می توان از نتایج بدست آمده از تئوری بیزین در زمینه های دیگری از انواع پایداری بهره گرفت. همچنین، نرخ دقت شبکه با افزایش تعداد ویژگیها کاهش پیدا می کند، پیشنهاد می شود ویژگی ها در ابتدا توسط یک الگوریتم بهینه سازی انتخاب شوند. همچنین، از آنجایی که روش پیشنهادی دارای یک تکنیک جستجوی هوشمندانه برای پیدا کردن تابع هدف است لذا می توان از آن در بعدهای وسیع تر و در زمینه پایدار نگه داشتن چندین ژنراتور در سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته استفاده نمود.

مراجع

1. S. Ranjbar "Online estimation of controlled islanding time intervals using dynamic state trajectories through cascading failures from WAMS data," *Electric Power Systems Research*, vol.214, pp.108890, Jan 2023.
2. S. Ranjbar, M. R. Aghamohammadi and F. Haghjoo, "A New Scheme of WADC for Damping Inter-Area Oscillation based on CART Technique and Thevenine Impedance," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol.94, pp 339-353, Jan 2018.
3. J. Qi, Q. Wu, Y. Zhang, G. Weng and D. Zhou, "Unified Residue Method for Design of Compact Wide-area Damping Controller Based on Power System Stabilizer," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 367-376, March 2020.
4. Q. Mou, H. Ye and Y. Liu, "Nonsmooth Optimization-Based WADC Tuning in Large Delayed Cyber-Physical Power System by Interarea Mode Tracking and Gradient Sampling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 668-679, Jan. 2019.
5. M. J. Alinezhad, M. Radmehr and S. Ranjbar, "Adaptive Wide Area Damping Controller for Damping Inter-Area Oscillations Considering High Penetration of Wind Farms," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 3, March 2020.
6. Soheil Ranjbar, "Adaptive criteria of estimating power system separation times based on inter-area signal", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.17, no.3, pp.573-588, February 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12750>
7. M. Bento, "Fixed Wide-Area Damping Controller Considering Time Delays and Power System Operation Uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.35, no.5, pp.3918-3926, Sept. 2020.
8. Thakallapelli and S. Kamalasan, "Wide-area damping of inter-area oscillations based on MIMO identification," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 13, pp. 2464-2475, 2020.
9. J. L. Rodríguez-Amenedo, S. A. Gómez, "Damping Low-Frequency Oscillations in Power Systems Using Grid-Forming Converters," *IEEE Access*, vol.9, pp.158984-158997, Nov.2021.
10. Y. Zhou, J. Liu, Y. Li, C. Gan, H. Li and Y. Liu, "A Gain Scheduling Wide-Area Damping Controller for the Efficient Integration of Photovoltaic Plant," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.34, no.3, pp.1703-1715, May 2019.
11. Zenelis, X. Wang and I. Kamwa, "Online PMU-Based Wide-Area Damping Control for Multiple Inter-Area Modes," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5451-5461, Nov. 2020.
12. Y. Shen, W. Yao, J. Wen, and L. Jiang, "Resilient Wide-Area Damping Control Using GrHDP to Tolerate Communication Failures," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2547-2557, May 2019.
13. N. R. Naguru and V. Sarkar, "Practical supplementary controller design for the bi-layer WAC architecture through structurally constrained H2 norm optimisation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 7, pp. 1095-1103, 9 4 2019.
14. L. Simon, K.S. Swarup and J. Ravishankar, "Wide area oscillation damping controller for DFIG using WAMS with delay compensation," *IET Renewable Power Generation*, vol.13, no.1, pp.128-137, 2019.
15. F. Wilches-Bernal, R. H. Byrne and J. Lian, "Damping of Inter-Area Oscillations via Modulation of Aggregated Loads," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.35, no.3, pp.2024-2036, May 2020.
16. X. Shi, Y. Cao, M. Shahidehpour, Y. Li, X. Wu and Z. Li, "Data-Driven Wide-Area Model-Free Adaptive Damping Control With Communication Delays for Wind Farm," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5062-5071, Nov. 2020.

17. T. Surinkaew, R. Shah, M. Nadarajah and S. M. Muyeen, "Forced oscillation damping controller for an interconnected power system," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, no. 2, pp. 339-347, Jan. 2020.
18. N. Naguru and Y. Ganapavarapu, "Design of a Limited State Feedback Wide-Area Power System Damping Controller Without Communication Channels," IEEE Access, vol.8, pp.160931-160946, 2020.
19. G. N. Baltas, N. B. Lai, L. Marin, A. Tarrasó and P. Rodriguez, "Grid-Forming Power Converters Tuned Through Artificial Intelligence to Damp Subsynchronous Interactions in Electrical Grids," IEEE Access, vol. 8, pp. 93369-93379, 2020.
20. M. Sarkar, B. Subudhi and S. Ghosh, "Unified Smith predictor based H_{∞} wide-area damping controller to improve the control resiliency to communication failure," IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 7, no. 2, pp. 584-596, March 2020.
21. J. A. Oscullo and C. F. Gallardo, "Residue Method Evaluation for the Location of PSS with Sliding Mode Control and Fuzzy for Power Electromechanical Oscillation Damping Control," IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 01, pp. 24-31, Jan. 2020.