

پیش بینی وضعیت پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تاثیر سیستم حفاظتی

پوریا اکبرزاده اقدم^۱، حمید خوشخو^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۵)

چکیده

در این مقاله، الگوریتمی نوین برای ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ دینامیکی سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن تاثیر سیستم حفاظتی ارائه می‌شود. این الگوریتم در شرایط وقوع اتصال کوتاه و عملکرد صحیح و یا ناصحیح سیستم حفاظتی که به ترتیب منجر به عملکرد سیستم قدرت در شرایط N-1 و N-k می‌شود، می‌تواند به دقت وضعیت پایداری ولتاژ را پیش‌بینی کند. برای این منظور، در این روش یک دسته ویژگی مناسب ارائه می‌شود که بر اساس آن بانک داده مربوط به شرایطی که وقوع اغتشاش و عملکرد صحیح / ناصحیح سیستم حفاظتی منجر به ناپایداری ولتاژ می‌شود، تهیه خواهد شد. سپس با گروه‌بندی و کدگذاری این داده‌ها، ضمن آنکه حجم بانک داده کاهش و سرعت اجرای الگوریتم افزایش چشم‌گیر می‌یابد، تاثیر خطاهای ناشی از تجهیزات اندازه‌گیری نیز تا حد امکان کاهش خواهد یافت. در نهایت، به کمک این بانک داده و شاخص جدیدی با نام FSI وضعیت پایداری سیستم در شرایط برخط به‌طور دقیق پیش‌بینی خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دینامیکی که در شبکه Nordic32 اجرا شده، نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند وقوع ناپایداری را چندین ثانیه تا چند دقیقه قبل از وقوع آن پیش‌بینی کند و فرصت کافی در اختیار اپراتورها برای اجرای اقدامات کنترلی مناسب قرار دهد.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های قدرت، پیش‌بینی پایداری ولتاژ، سیستم حفاظتی.

Prediction of Voltage Stability Status Considering the Impact of the Protection System

P. Akbarzadeh Aghdam, H. Khoshkhou*

Sahand University of Technology

(Received: 09/11/2020; Accepted: 05/06/2021)

Abstract

In this paper, a novel algorithm is proposed to evaluate the dynamic voltage stability of power systems considering the effect of the protection system. In short circuit occurrence and the correct or incorrect operation of the protection system, which leads to the operation of the power system in N-1 and N-k conditions, respectively, this algorithm can accurately predict the voltage stability status. For this purpose, in this method a suitable feature set is presented, according to which a database will be prepared to record the conditions in which the disturbances and correct / incorrect operations of the protection system leading to voltage instability, occur. By grouping and encoding this data, while the size of the database decreases and the execution speed of the algorithm increases significantly, the effect of errors caused by the measuring equipment is also reduced as much as possible. Finally, with the help of this data set and a new index called FSI, the stability of the system in online conditions is accurately predicted. The results of dynamic simulations performed on the Nordic32 network show that the proposed method can predict the instability occurrence several seconds to a few minutes in advance and thus provide ample opportunity for the system operators to implement appropriate control measures.

Keywords: Power Systems, Voltage Stability Prediction, Protection System.

۱- مقدمه

به عنوان مثال، در شبکه برق ایران، در سال ۱۳۸۰ یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولتی از مسیر شهر سلیمی به آهوان از مدار خارج شد که منجر به افزایش توان انتقالی از خط انتقال موازی آن، عملکرد رله اضافه جریان این خط، و در نتیجه از مدار خارج شدن خط موازی شد [۷]. به این ترتیب، منطقه وسیعی دچار کمبود توان شده و در نتیجه تامین قسمتی از این توان به نیروگاه گیلان واگذار شد که پیش از آن در حداکثر بارگذاری مجاز خود قرار داشت. این موضوع سبب شد که رله اضافه جریان ترانسفورماتور این نیروگاه عمل کرده و آن را از سیستم جدا کند. در ادامه این حادثه، کاهش توان تولیدی در منطقه چندین برابر شده و در نهایت با کمبود توان به میزان ۹۵۰ مگاوات مواجه شد. از طرف دیگر، خط انتقال مابین دو منطقه اصلی دچار اضافه جریان شده و زون ۳ رله دیستانس این خط را از مدار خارج کرد. با قطع این ارتباط، کمبود توان به ۱۱۰۰ مگاوات افزایش یافت و سه منطقه جزیره‌ای ایجاد شد [۷]. همچنین، واحدهای تولیدی پیرامون نیز توسط رله‌های Under frequency (به دلیل کاهش فرکانس) از سیستم خارج شدند. در چندین منطقه دیگر نیز ولتاژ افت کرده و رله‌های Under Voltage عمل کردند و در نهایت ناپایداری ولتاژ در ناحیه شمالی از شبکه برق ایران اتفاق افتد که سبب خسارت گسترده شد.

در سال ۱۳۸۲ نیز یک اتصال کوتاه تک فاز به زمین در خط انتقال مابین پست انجیرک و پست اراک رخ داد. از آنجایی که خطا به پست انجیرک بسیار نزدیک بوده است، کلید موجود در این پست توانایی پاکسازی خطا را نداشته و نهایتاً پس از ۵۶ سیکل، کلید منفجر شد. با توجه به این که در پیرامون این حادثه کلید حفاظتی وجود نداشته است، لذا رله‌های سایر نواحی دورتر وارد عمل شده و قسمت بزرگی از شبکه دچار خاموشی سراسری شد [۷]. در ادامه‌ی این حادثه، رله‌های دیستانس و اضافه جریان سایر نواحی نیز عمل کرده و شبکه برق کشور به پنج منطقه جزیره‌ای تبدیل شد [۷].

طبق گزارشات، یکی از مهمترین دلایل وقوع دو حادثه ذکر شده، عدم هماهنگی رله‌های حفاظتی بوده است. علاوه بر این، بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان نشان می‌دهد که در چندین ناپایداری نظیر فروپاشی شبکه آمریکا-کانادا [۸] و شبکه برق آلمان [۸]، سیستم حفاظتی تاثیر حائز اهمیتی بر وقوع خاموشی سراسری داشته است. بر این اساس، بدیهی است که پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ بدون در نظر گرفتن تاثیر سیستم حفاظتی نمی‌تواند منجر به نتایج قابل اعتماد شود و لازم است که در ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ، تاثیر عملکرد صحیح/ ناصحیح سیستم حفاظتی لحاظ شود.

تاکنون روش‌های متعددی برای ارزیابی وضعیت پایداری شبکه قدرت ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر حساسیت و تابع انرژی [۹، ۱۰]، تحلیل مودال

در دهه گذشته، در راستای رشد صنایع و مصارف برق شهری، بارگذاری شبکه قدرت به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. همین امر موجب شده است تا نقاط کار این شبکه‌ها به سمت مرزهای ناپایداری حرکت کنند. طبق تعریف، منظور از پایداری سیستم قدرت به ازاء یک شرایط کار اولیه، توانایی سیستم قدرت در رسیدن به نقطه تعادل پس از وقوع یک اغتشاش است، به گونه‌ای که متغیرهای سیستم قدرت در محدوده قابل قبول قرار گیرند و عملاً بخش عمده‌ای از سیستم بدون تغییر باقی بماند [۱].

به‌همین دلیل، امنیت سیستم قدرت در مقابل اغتشاشات و حملات سایبری و فیزیکی به شدت کاهش یافته است [۲]. از آنجایی که وقوع ناپایداری در شبکه‌های قدرت، پیامدهای امنیتی و اقتصادی بسیار سنگینی را به همراه دارد، سیستم‌های قدرت به یکی از نقاط ضعف حائز اهمیت در شرایط وقوع حملات احتمالی تبدیل شده‌اند.

بر این اساس روش‌های مختلفی به منظور پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع ناپایداری ارائه شده است که در آنها تاثیر رفتار دینامیکی تجهیزات مختلف شبکه مانند ژنراتورهای سنکرون، منابع تجدیدپذیر، ترانسفورماتورهای OLTC، بارها و موتورهای القایی در نظر گرفته شده است [۳-۵]. با این حال، مطالعات گسترده نویسندگان نشان می‌دهد که در تحقیقات مرتبط با فروپاشی شبکه‌های قدرت که تاکنون در چندین نقطه جهان رخ داده است [۶]، تاثیر عملکرد سیستم حفاظتی بر پایداری سیستم قدرت مورد بررسی قرار نگرفته است.

وظیفه‌ی اصلی سیستم حفاظت شبکه‌های قدرت این است که در صورت بروز اتصال کوتاه در یک تجهیز که منجر به عملکرد غیرعادی شبکه خواهد شد، در کوتاه‌ترین زمان ممکن تجهیز مورد نظر را از شبکه خارج کند و مانع از آسیب رسیدن به تجهیزات شبکه شود. در چنین شرایطی شبکه در حالت N-1 عمل خواهد کرد و لازم است که اپراتورهای سیستم با انجام اقدامات پیشگیرانه و اصلاح‌کننده مورد نیاز، مانع از وقوع ناپایداری شوند. با این وجود، همواره این احتمال وجود دارد که عملکرد ناصحیح سیستم حفاظتی (مانند عدم تنظیم مناسب رله‌ها، عدم عملکرد صحیح کلید، و یا تاخیر در عملکرد رله اصلی) منجر به خروج تعداد بیشتری از تجهیزات شبکه شده و در نتیجه بطور ناگهانی شرایط N-k حاصل شود. بدیهی است که در این حالت، به دلیل آنکه احتمال وقوع ناپایداری (از نوع کوتاه‌مدت و بلند مدت) افزایش چشمگیری می‌یابد، نیاز به ابزارهای سریع برای ارزیابی دقیق وضعیت پایداری دینامیکی اهمیت بسزایی خواهد یافت.

مربوط به شرایطی که وقوع اغتشاش و عملکرد صحیح و یا ناصحیح سیستم حفاظتی منجر به وقوع ناپایداری می‌شود، تهیه خواهد شد. سپس با گروه‌بندی و کدگذاری این داده‌ها، ضمن آنکه حجم این بانک داده کاهش و سرعت اجرای الگوریتم بطور چشم‌گیری افزایش می‌یابد، تاثیر خطاهای ناشی از تجهیزات اندازه‌گیری نیز تا حد امکان کاهش خواهد یافت. در نهایت به منظور بررسی تاثیر وقوع یک اغتشاش و عملکرد صحیح و یا ناصحیح سیستم حفاظتی بر وضعیت پایداری شبکه در شرایط عملکرد برخط، شاخص جدیدی به نام شاخص تشابه ویژگی (Feature Similarity Index) FSI ارائه شده است که تشابه نقطه کار شبکه و بانک داده آماده شده را بررسی و بر اساس آن، وضعیت پایداری سیستم را به‌طور دقیق پیش‌بینی خواهد کرد.

در بخش ۲ این مقاله، الگوریتم ارائه شده توضیح داده شده و در بخش ۳ نیز نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت، در بخش ۴ مقاله به اتمام خواهد رسید.

۲- روش ارائه شده

با در دست داشتن شبکه مدل‌سازی شده (که در آن علاوه بر مشخصات دینامیکی تجهیزات، رله‌های حفاظتی نیز مدل‌سازی شده‌اند)، مراحل کلی الگوریتم ارائه شده به صورت زیر قابل بیان است:

مرحله اول: هدف از این مرحله، اجرای شبیه‌سازی‌های متعدد در شبکه مورد

نظر است؛ به‌گونه‌ای که تمام آنها منجر به ناپایداری شوند. برای این منظور، سناریوهای بی‌شماری با اعمال اغتشاش‌های متفاوت از قبیل اتصال کوتاه، خروج ژنراتور، خروج خط و غیره اجرا خواهند شد که در میان آنها، تنها آن دسته از اغتشاش‌هایی که منجر به ناپایداری شده‌اند، انتخاب می‌شوند. قابل ذکر است که در این شبیه‌سازی‌ها، هم عملکرد صحیح و هم عملکرد ناصحیح سیستم حفاظتی در نظر گرفته می‌شود و هر یک از آنها که منجر به ناپایداری شبکه شوند انتخاب خواهند شد (در شرایط عملکرد ناصحیح سیستم حفاظتی، عدم عملکرد رله اصلی منجر به عملکرد رله‌های پشتیبان می‌شود و در نتیجه چندین تجهیز از مدار خارج شده و شرایط N-k رخ می‌دهد).

مرحله دوم: در شبیه‌سازی‌ها اشاره شده در مرحله قبل (که منجر به ناپایداری شده‌اند)، برخی از ویژگی‌های سیستم (که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد)، اندازه‌گیری شده و پس از گذر از یک

[۱۱]، منحنی‌های PV و QV [۱۲، ۱۳]، بررسی پایداری ولتاژ با استفاده از شاخص‌های شین [۱۸-۱۴]، شاخص‌های خط [۲۴-۱۹] و همچنین روش مدار معادل تونن [۲۵] اشاره نمود.

از میان این روش‌ها، اگرچه روش‌های مبتنی بر حساسیت و تابع انرژی برای ارزیابی پیوسته وضعیت پایداری سیستم و تعیین تاثیر عملکرد صحیح/ ناصحیح سیستم حفاظتی بر پایداری ولتاژ شبکه مناسب به نظر می‌آیند، به‌دلیل حجم محاسبات بالای این روش‌ها، نمی‌توان از آنها در عملکرد برخط شبکه استفاده نمود. علاوه بر این، به‌دلیل مشکلات مربوط به تعیین تابع لیاپانوف مناسب، روش‌های مبتنی بر تابع انرژی معمولاً از مدل‌های درجه بالای ژنراتور و کنترل‌کننده‌های آن صرف‌نظر می‌کنند که سبب خطا در ارزیابی وضعیت پایداری خواهد شد. علاوه بر این، منحنی‌های PV، QV و شاخص‌های ارزیابی وضعیت پایداری معمولاً مبتنی بر شرایط پایدار هستند و عملکرد مناسبی در شرایط گذرا پس از وقوع اغتشاش (به‌ویژه در شرایط عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی که منجر به وقوع رفتارهای گذرای شدید می‌شود) ندارند.

در کنار روش‌های فوق، امروزه ابزارهای هوش مصنوعی [۲۶-۲۹] و آنالیز داده [۳۰] به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند و یکی از مهمترین کاربردهای آنها ارزیابی وضعیت پایداری شبکه به منظور تعیین ضرورت اجرای اقدامات اصلاحی و حفظ پایداری شبکه است. ابزارهای هوش مصنوعی، در ابتدا نیاز به یادگیری داشته و سپس در شرایط برخط، با دریافت داده‌های جدید از سیستم اندازه‌گیری اسکادا (SCADA) و یا سیستم پایش سراسری (WAMS)، پردازش‌های مورد نیاز را انجام می‌دهند و وضعیت پایداری را تخمین می‌زنند. بدیهی است که برای داشتن خروجی مطلوب و دقیق، استفاده از بانک داده جامع و کامل برای یادگیری ابزارهای هوش مصنوعی ضروری است. با این حال، برای پیش‌بینی وضعیت پایداری با در نظر عملکرد نامناسب سیستم حفاظتی که ممکن است سبب وقوع شرایط N-k مختلف (به جای شرایط N-1) شود، تهیه چنین بانک داده‌ای بسیار پیچیده خواهد بود. به همین دلیل، طبق مطالعات انجام شده توسط محققان، تاکنون روشی برای پیش‌بینی وضعیت پایداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن تاثیر عملکرد سیستم حفاظتی ارائه نشده است.

برای رفع مشکلات فوق، در این مقاله یک الگوریتم هوشمند نوین جهت پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تاثیر عملکرد سیستم‌های حفاظتی (رله‌های اضافه جریان، دیستانس، دیفرانسیل، کاهش/افزایش ولتاژ و فرکانس) ارائه شده است که در آن ضعف روش‌هایی که در بالا اشاره شد، برطرف شده است. در این روش یک دسته ویژگی مناسب ارائه می‌شود که بر اساس آن یک بانک داده

برای ثبت هر داده دو نکته زیر باید رعایت شود:

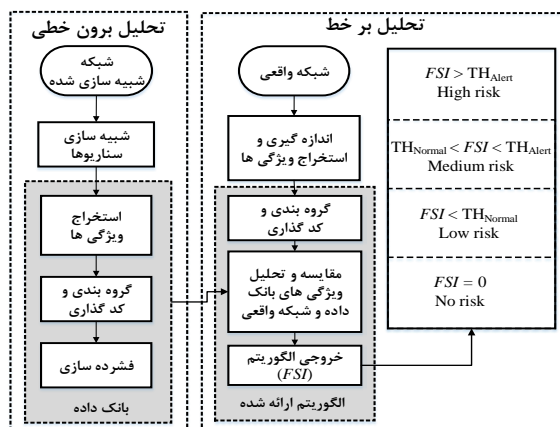
- در ابتدای شبیه‌سازی (ثانیه صفر) یکبار با استفاده از تحلیل پخش بار (استاتیکی) تمامی ویژگی‌ها اندازه‌گیری شده و به عنوان مقادیر اولیه در بانک داده ذخیره می‌شوند. پس از آن، با اجرای شبیه‌سازی دینامیکی، هر یک از ویژگی‌های تعیین شده در هر ΔT ثانیه اندازه‌گیری شده و جایگزین مقدار قبلی می‌شود.
- به منظور کاهش حجم داده‌های ذخیره شده در بانک داده، ویژگی‌های اندازه‌گیری شده قبل از ثبت در بانک داده باید کدگذاری شوند و به صورت کدگذاری شده در بانک داده ذخیره شوند که در ادامه نحوه کدگذاری توضیح داده می‌شود.

ب) کدگذاری ویژگی‌ها

قبل از کدگذاری ویژگی‌ها، ابتدا باید گروه‌بندی آنها انجام شود. در گام اول، برای هر ویژگی ذکر شده (مانند توان اکتیو بارها P_{load})، چند آستانه تعریف می‌شود. در این مقاله، بر اساس نتایج شبیه‌سازی-های انجام شده، هر ویژگی به شش گروه دسته‌بندی شده است. برای مثال، چهار آستانه به ترتیب صعودی $P_{rang 1}$ ، $P_{rang 2}$ ، $P_{rang 3}$ و $P_{rang 4}$ برای توان اکتیو بارها تعریف می‌شود و بر اساس آنها، گروه-بندی این ویژگی به صورت رابطه (۱) انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} P_{load}^i = 0 &\rightarrow \text{Group 0} \\ 0 < P_{load}^i < P_{rang 1} &\rightarrow \text{Group 1} \\ P_{rang 1} \leq P_{load}^i < P_{rang 2} &\rightarrow \text{Group 2} \\ P_{rang 2} \leq P_{load}^i < P_{rang 3} &\rightarrow \text{Group 3} \\ P_{rang 3} \leq P_{load}^i < P_{rang 4} &\rightarrow \text{Group 4} \\ P_{load}^i \geq P_{rang 4} &\rightarrow \text{Group 5} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، P_{load}^i توان اکتیو مربوط به بار i ام می‌باشد. مشاهده می‌شود که توان اکتیو مربوط به هر بار که در یک لحظه مشخص اندازه‌گیری می‌شود، با توجه به اینکه مابین چه آستانه‌هایی قرار دارد، در یکی از شش گروه قرار می‌گیرد (تعیین مقادیر آستانه‌ها نقش مهمی داشته و در بخش‌های آتی توضیح داده خواهد شد).



شکل ۱. شماتیک الگوریتم ارائه شده.

مرحله کدگذاری، ضمن آنکه از حجم آنها کاسته شده، در یک بانک داده ذخیره می‌شوند. بدیهی است که هر چه تعداد سناریوهای اجرا شده بیشتر باشد، دقت عملکرد الگوریتم ارائه شده نیز بیشتر خواهد بود.

مرحله سوم: در شرایط برخط، در هر لحظه ویژگی‌هایی از سیستم که برای تشکیل بانک داده لحاظ شده بودند، اندازه‌گیری شده و در یک آرایه بصورت کدگذاری شده ذخیره می‌شوند. در عین حال، در هر لحظه با استفاده از شاخص تشابه ویژگی FSI که در ادامه ارائه و توضیح داده شده است، تشابه مابین این آرایه و بانک داده محاسبه می‌شود.

مرحله چهارم: تشابه محاسبه شده از مرحله قبل (با استفاده از FSI) نمی‌تواند به تنهایی معیاری برای پیش‌بینی وقوع ناپایداری یا فروپاشی باشد. از همین جهت، دو آستانه برای شاخص مذکور تعریف می‌شود تا میزان خطر ناپایداری را بیان کند. براین اساس، اگر FSI مابین صفر و آستانه‌ی TH_{Normal} باشد، خطر ناپایداری کم بوده (Low risk) و اگر مابین TH_{Alert} و TH_{Normal} قرار گیرد، بیانگر خطر متوسط (Medium risk) می‌باشد. همچنین، برای مقادیر بیشتر از TH_{Alert} نیز، خطر زیاد (High risk) در نظر گرفته شده است.

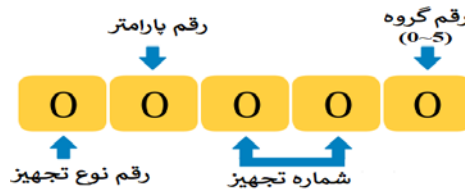
در نتیجه، ورودی الگوریتم ارائه شده ویژگی‌های انتخاب شده از سیستم قدرت بوده و در خروجی، در هر لحظه احتمال وقوع ناپایداری دینامیکی محاسبه خواهد شد. شکل (۱) خلاصه روش ارائه شده را نشان می‌دهد که در ادامه هر بخش از آن توضیح داده خواهد شد.

الف) استخراج ویژگی‌ها

انتخاب مناسب ویژگی‌های ذکر شده سیستم، تاثیر بسزایی در افزایش دقت روش ارائه شده دارد. در این تحقیق، با انجام مطالعات گسترده و جامع در شرایط مختلف از عملکرد شبکه، در نهایت ویژگی‌های زیر انتخاب شده‌اند که همگی در شرایط عملکرد برخط شبکه توسط سیستم WAMS قابل اندازه‌گیری می‌باشند:

- توان اکتیو و توان راکتیو بارهای شبکه
- توان اکتیو و توان راکتیو گذرنده از خطوط
- توان اکتیو و توان راکتیو تولیدی توسط ژنراتورها و سایر منابع
- زاویه روتور و درصد بارگذاری ژنراتورها
- ولتاژ و فرکانس شین‌ها
- موقعیت تپ ترانسفورماتورهای OLTC

بر این اساس، در حین اجرای هر شبیه‌سازی، ویژگی‌های مربوط به تجهیزات در هر گام زمانی ΔT (که در این مقاله $\Delta T = 0.5$ s در نظر گرفته شده است) اندازه‌گیری شده و آماده ثبت در بانک داده می‌شوند.



شکل ۲. نحوه کدگذاری داده‌ها.

جدول ۱. نحوه تعیین رقم نوع تجهیز

نوع تجهیز	بار	خط	ژنراتور	شین	ترانسفورماتور
رقم نوع تجهیز	۱	۲	۳	۴	۵

جدول ۲. نحوه تعیین رقم پارامتر

نوع تجهیز	بار، خط و ژنراتور	ژنراتور	شین	ترانسفورماتور
نوع پارامتر	توان اکتیو توان راکتیو	بارگذاری زاویه روتور	ولتاژ فرکانس	تپ
رقم پارامتر	۱ ۲	۳ ۴	۱ ۲	۱

می‌کند که داده‌ی مربوطه در چه محدوده‌ای قرار دارد. این روش مزیت‌هایی را که در ادامه ذکر می‌شوند، خواهد داشت:

- از آنجایی که به‌جای مقادیر دقیق اندازه‌گیری شده، تنها گروه داده‌ها (با توجه به آستانه‌ی مربوطه) ثبت شده‌اند، لذا اگر تغییرات جزئی در مقادیر اندازه‌گیری رخ دهد، به‌طوریکه داده از آستانه خود خارج نشده و گروه آن تغییر نکند، داده‌ای که در بانک داده ثبت خواهد شد نیز بدون تغییر باقی خواهد ماند. به عبارت دیگر، تغییرات جزئی در ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، هیچ تاثیری بر بانک داده و در راستای آن بر الگوریتم نخواهد داشت. این خصوصیت باعث می‌شود تا اگر (به‌دلیل خطای تجهیزات اندازه‌گیری) اندکی مغایرت بین مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و شبکه واقعی وجود داشته باشد، پاسخ خروجی الگوریتم دچار تغییر و خطا نشود.

- با توجه به روش جایگذاری آخرین مقدار هر ویژگی به جای مقدار قبل خود، حجمی که کدهای مذکور در بانک داده اشغال می‌کنند بسیار کمتر از حجم اشغال شده توسط مقادیر دقیق و تکراری ویژگی‌ها خواهد بود. در نتیجه، بانک داده تهیه شده بسیار کم حجم‌تر از بانک داده سایر روش‌های پیشین (که در مقالات ارائه شده‌اند) است.

- مزیت سوم روش ارائه شده مربوط به سرعت پردازش بیشتر الگوریتم است که به کم حجم‌تر شدن بانک داده باز می‌گردد.

تعیین مقدار و تعداد آستانه‌ها نقش مهمی در عملکرد روش ارائه شده ایفا می‌کنند. اگر اختلاف مقدار آستانه‌ها بیش از حد کم باشد، تغییرات جزئی به وجود آمده در سیستم باعث تغییر گروه متوالی ویژگی‌ها شده و خروجی الگوریتم دچار نوسان می‌شود. همچنین، اگر اختلاف مقادیر آستانه‌ها بیش از حد زیاد باشد، تغییرات ایجاد شده در شبکه، در بانک داده ظاهر نخواهند شد. به همین ترتیب، مقدار آستانه‌ها نیز اهمیت بسزایی دارد. لذا در ادامه، بر اساس شبیه‌سازی‌های متعدد و گسترده انجام

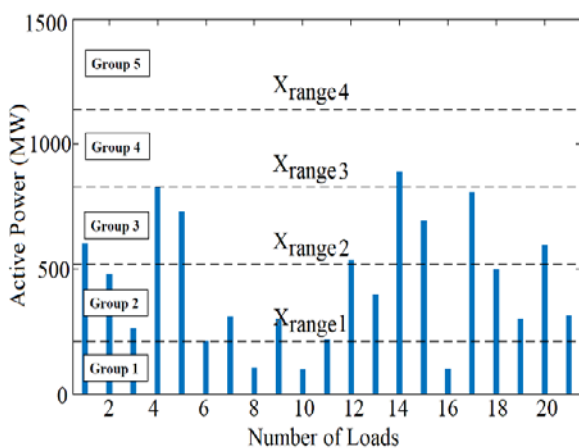
پس از انجام گروه‌بندی، کدگذاری مقادیر اندازه‌گیری شده (در هر ΔT ثانیه) میسر خواهد بود. هدف از کدگذاری داده‌ها، سهولت در نام‌گذاری هر داده به منظور عدم هم‌نامی داده‌های مختلف در بانک داده است. روشی که در این الگوریتم ارائه شده، استفاده از کد ۵ رقمی برای کدگذاری هر ویژگی اندازه‌گیری شده می‌باشد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، رقم اول از سمت چپ مربوط به "رقم نوع تجهیز" می‌باشد که مشخص کننده نوع تجهیز اندازه‌گیری شده (بار، خط و ...) است. پس از آن رقم دوم بیانگر پارامتر اندازه‌گیری شده (توان اکتیو، ولتاژ و ...) و دو رقم بعدی نیز شماره تجهیز می‌باشد. برای مثال، شماره تجهیز تعیین می‌کند که توان اکتیو تولیدی چندمین ژنراتور اندازه گرفته شده است. آخرین رقم نیز همان شماره گروه تعیین شده (به روش ذکر شده در رابطه ۱) است. در این مقاله، تعیین "رقم نوع تجهیز" و رقم مربوط به پارامتر اندازه‌گیری شده، (به‌طور قراردادی) بر اساس جدول (۱ و ۲) انجام می‌شود.

برای مثال، اگر ولتاژ شین ۱۵ ام شبکه، با توجه به آستانه‌های تعیین شده در گروه ۳ قرار داشته باشد، کد مربوط به این داده ۴۲۱۵۳ بوده و در بانک داده در یک سطر ثبت می‌شود. حال اگر پس از گذشت ΔT ثانیه، مقدار همان ولتاژ کاهش یافته و در گروه ۲ قرار گیرد، کد جدید (۴۲۱۵۲) در جای کد قبلی (۴۲۱۵۳) ثبت خواهد شد. همچنین، اگر یک تجهیز مانند خط ۵ ام یک شبکه از مدار خارج شود، توان اکتیو و توان راکتیو گذرنده از آن صفر شده و کدهای مربوط به این داده‌ها به‌ترتیب ۲۱۰۵۰ و ۲۲۰۵۰ خواهد بود.

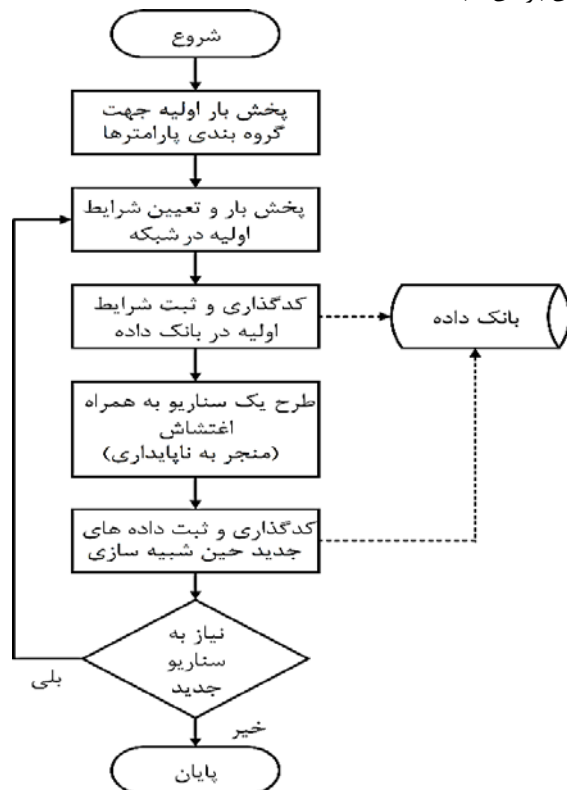
طبق روش توضیح داده شده برای کدگذاری داده‌ها، مشخص است که مقادیر دقیق ویژگی‌ها در بانک داده ثبت نمی‌شود؛ بلکه تنها کد مربوط به گروه آنها ثبت شده و تعیین

صحیح و هم عملکرد ناصحیح سیستم حفاظتی (که به ترتیب سبب وقوع شرایط N-1 و N-k خواهند شد) در نظر گرفته می‌شود.

• **مرحله چهارم:** در حین شبیه‌سازی، در حالت پایدار تغییراتی در پارامترهای شبکه رخ نخواهد داد و در نتیجه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و همچنین سطر مورد نظر از بانک داده بدون تغییر باقی خواهند ماند. پس از وقوع اغتشاش، این پارامترها دچار تغییرات شده و در صورت گذر از آستانه‌های تعیین شده در رابطه (۳) و تغییر در گروه داده، ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با توجه به گروه جدید کدگذاری شده، در بانک داده به جای آخرین مقدار ثبت شده مربوط به خود در سطر فعلی جایگذاری می‌شوند.



شکل ۳. نمونه‌ای از نحوه گروه‌بندی توان‌های اکتیو اندازه‌گیری شده برای بارهای شبکه Nordic32.



شکل ۴. روندنمای نحوه تهیه بانک داده.

شده، نحوه تعیین تعداد گروه‌ها و آستانه‌ها (به گونه‌ای که نتیجه مطلوب حاصل کند) توضیح داده شده است.

در ابتدا، در حالت پایدار و بارگذاری پایه شبکه، تحلیل پخش بار اجرا می‌شود و مقادیر تمامی ویژگی‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سپس، مقدار میانگین برای هر ویژگی مانند ویژگی X (X_{avg}) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$X_{avg} = \frac{\sum_{k=1}^{n_l} X_k}{n_l} \quad (2)$$

در این رابطه، n_l تعداد تجهیزات مربوط به ویژگی X (مانند تعداد ژنراتورها) و X_k مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده مربوط به تجهیز شماره k است.

در مرحله بعد، مقدار آستانه‌ها (X_{range1} , X_{range2} , X_{range3} و X_{range4}) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شوند. در این رابطه، X_{min} کمترین مقدار به دست آمده ویژگی X از پخش بار است.

$$\begin{aligned} X_{range1} &= \frac{X_{avg} - X_{min}}{2} \\ X_{range2} &= X_{avg} \\ X_{range3} &= 2X_{range2} - X_{range1} \\ X_{range4} &= 2X_{range3} - X_{range2} \end{aligned} \quad (3)$$

شکل (۳) نمونه‌ای از توان اکتیو اندازه‌گیری شده برای بارهای شبکه Nordic32 [۳۱] و گروه‌بندی آنها توسط رابطه (۳) را نشان می‌دهد.

ج) تهیه بانک داده

برای تهیه بانک داده به منظور استفاده از آن برای پیش‌بینی وضعیت پایداری سیستم، الگوریتم شکل (۴) که در ادامه توضیح داده شده، اجرا می‌شود. لازم به ذکر است که در این مقاله، برای اجرای شبیه‌سازی‌های استاتیکی و دینامیکی از نرم‌افزار DigSILENT Power Factory استفاده شده است.

• **مرحله اول:** اجرای پخش بار اولیه و گروه‌بندی ویژگی‌های سیستم (ولتاژ شین، بارگذاری ژنراتور و ...) به روش ذکر شده در بخش (ب).

• **مرحله دوم:** کدگذاری شرایط اولیه سیستم با استفاده از روش مذکور در بخش (ب) و ثبت آنها در سطر جدیدی از بانک داده.

• **مرحله سوم:** اجرای شبیه‌سازی دینامیکی (جهت بررسی یک یا چند اغتشاش مانند اتصال کوتاه، خروج ژنراتور، افزایش بار، خروج خط و غیره که در نهایت منجر به ناپایداری سیستم می‌شود) و اندازه‌گیری تمامی ویژگی‌های مورد نظر (در صورتی که سناریو مطرح شده باعث ناپایداری سیستم نشود، سناریو دیگری برای اجرای شبیه‌سازی طرح می‌شود). لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی‌ها، هم عملکرد

هوشمند می‌شود. با این حال، می‌توان بانک داده حاصل شده از بخش قبل را فشرده‌تر نیز کرد. برای این منظور، دو مرحله انجام می‌شود:

• **حذف ویژگی‌های ثابت:** ممکن است یک یا چند ویژگی از سیستم در هیچ کدام از سناریوهای انجام شده تغییر نکرده باشند و یا تغییرات آن‌ها مابین دو آستانه بوده و منجر به تغییر گروه داده نشده باشد. در این صورت، این ویژگی‌ها از بانک داده شناسایی شده و حذف می‌شوند.

• **مرحله پنجم:** پس از پایان شبیه‌سازی و ثبت داده‌ها در بانک داده، در صورت لزوم به مرحله سوم بازگشته و سناریو دیگری اجرا می‌شود و نتایج آن (که از مرحله چهارم بدست می‌آید) در سطر جدیدی از بانک داده ثبت می‌شود.

همانطور که در بخش‌های گذشته نیز اشاره شد، الگوریتم ارائه شده به دلیل گروه‌بندی و کدگذاری داده‌ها (به جای استفاده از مقادیر دقیق پارامترها مانند آنچه که در بانک داده درخت تصمیم‌گیری و یا سایر ابزارهای هوش مصنوعی لازم است) منجر به بانک داده کم حجم‌تری نسبت به سایر ابزارهای

جدول ۳. نمونه‌ای از فضای داخلی بانک داده با ۶ سناریو و ۸ ویژگی کدگذاری شده.

→ سناریو ۱	۱۱۰۱۳	۱۲۰۱۲	۲۱۰۱۴	۲۲۰۱۳	۳۱۰۱۱	۳۱۰۲۱	۳۱۰۲۵	۳۲۰۲۲
→ سناریو ۲	۱۱۰۱۱	۱۲۰۱۵	۲۱۰۱۲*	۲۲۰۱۳*	۳۱۰۱۲*	۳۱۰۲۱	۳۱۰۲۱	۳۲۰۲۴
→ سناریو ۳	۱۱۰۱۵	۱۲۰۱۵	۲۱۰۱۳	۲۲۰۱۵	۳۱۰۱۱	۳۱۰۲۱	۳۱۰۲۱	۳۲۰۲۴
→ سناریو ۴	۱۱۰۱۴	۱۲۰۱۴	۲۱۰۱۳	۲۲۰۱۵	۳۱۰۱۲	۳۱۰۲۵	۳۱۰۲۵	۳۲۰۲۲
→ سناریو ۵	۱۱۰۱۳	۱۲۰۱۱	۲۱۰۱۴	۲۲۰۱۳	۳۱۰۱۲	۳۱۰۲۳	۳۱۰۲۲	۳۲۰۲۴
→ سناریو ۶	۱۱۰۱۲	۱۲۰۱۳	۲۱۰۱۱	۲۲۰۱۱	۳۱۰۱۱	۳۱۰۲۱	۳۱۰۲۳	۳۲۰۲۳

جدول ۴. نمونه‌ای از فضای داخلی آرایه شامل شرایط فعلی (در حالت برخط) کدگذاری شده شبکه.

۱۱۰۱۳	۱۲۰۱۲	۲۱۰۱۲*	۲۲۰۱۳*	۳۱۰۱۲*	۳۱۰۲۳	۳۱۰۲۵	۳۲۰۲۲
-------	-------	--------	--------	--------	-------	-------	-------

• **مرحله دوم:** در هر لحظه از عملکرد شبکه در حالت برخط، ویژگی‌ها اندازه‌گیری شده و در صورتی که (بر اثر وقوع اغتشاش در شبکه)، گروه مربوط به آنها تغییر کند، کد جدید آن ویژگی به جای آخرین مقدار خود ثبت می‌شود.

• **مرحله سوم:** علاوه بر این، در هر لحظه شاخص FSI_r مابین آرایه تشکیل شده (مربوط به حالت برخط) با سطر r ام ($r=1, 2, \dots, T$) از بانک داده محاسبه می‌شود که T تعداد سطرهای موجود در بانک داده (یا تعداد شبیه‌سازی‌های انجام شده در بانک داده که نتایج هر مورد در یک سطر ذخیره شده‌اند) می‌باشد. این شاخص مشخص می‌کند که آرایه تشکیل شده از شبکه‌ی واقعی چند درصد ویژگی مشترک با سطر r ام بانک داده دارد. در این مقاله، FSI_r به‌صورت رابطه (۴) معرفی می‌شود.

$$FSI_r = \frac{NSE_r}{TNE} \times 100\% \quad (4)$$

در روابط فوق، NSF_r (Number of Similar Features) تعداد ویژگی‌های مشترک بین آرایه و سطر r ام (سناریو r ام) از بانک داده و TNF (Total Number of Features) تعداد ویژگی‌های کدگذاری شده در یک سطر از بانک داده است. برای مثال، با مقایسه آرایه جدول (۵) و سطر ۲ (سناریو ۲) از بانک داده جدول (۴)، مقدار FSI_2 به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود. ویژگی‌های

• **حذف سطرهای مکرر:** در بانک داده ممکن است یک یا چند سطر یکسان وجود داشته و فضای آن را اشغال کنند. دلیل این موضوع آن است که دو یا چند سناریوی مختلف اجرا شده ممکن است پاسخ و خروجی تقریباً یکسانی داشته باشند. در این صورت، یکی از این سناریوها (سطرها) در بانک داده مربوطه حفظ شده و سایر سطرهای مشابه حذف می‌شوند.

(د) ارزیابی پایداری با استفاده از بانک داده در شرایط عملکرد برخط شبکه

پس از تشکیل بانک داده، می‌توان وضعیت پایداری سیستم قدرت در شرایط برخط را به کمک بانک داده تهیه شده در بخش قبل، با دقت مطلوب پیش‌بینی نمود. مراحل این الگوریتم در ادامه ذکر شده است.

• **مرحله اول:** در حالت برخط، ابتدا تمامی ویژگی‌هایی که در بانک داده نیز لحاظ شده بودند، اندازه‌گیری شده و بعنوان شرایط اولیه در یک آرایه سطری ثبت می‌شوند. در واقع این آرایه، نشان دهنده حالات فعلی شبکه در حالت برخط است که از کنار هم گذاشتن ویژگی‌های کدگذاری شده ایجاد شده است. جدول (۳ و ۴) به ترتیب نمونه‌ای از فضای داخلی بانک داده و آرایه شامل شرایط فعلی شبکه (در حالت برخط) را نشان می‌دهند.

و مدل ترانسفورماتورهای OLTC در نظر گرفته شده و بارهای موجود در شبکه نیز بصورت وابسته به ولتاژ مدل‌سازی شده‌اند.

الگوریتم ارائه شده با شاخص شین $SVSI$ که در رابطه (۹) اشاره شده است [۱۴] و شاخص خط VSI_2 که در رابطه (۱۰) اشاره شده است [۲۴] و از جمله متداول‌ترین شاخص‌های ارزیابی پایداری ولتاژ هستند، نیز مقایسه گردیده است. طبق ادعای مراجع مربوط به این دو شاخص، مقدار این شاخص‌ها مابین صفر و یک تغییر می‌کنند و در لحظه‌ی وقوع ناپایداری به یک می‌رسند.

$$SVSI = \frac{\Delta V_r}{\beta V_r}; \Delta V_r = |V_g - V_r|; \beta = 1 - [|V_m| - |V_l|]^2 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، V_g ولتاژ نزدیک‌ترین ژنراتور به شین بار، V_r ولتاژ شین بار و V_m و V_l به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ شین شبکه هستند.

$$VSI_2 = \frac{4Q_r(R + X)^2}{X(V_s^2 + 8RQ_r)} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، Q_r توان راکتیو گذرنده از یک خط دلخواه از شبکه، R و X به ترتیب مقاومت و راکتانس همان خط، و V_s ولتاژ شین فرستنده توان راکتیو به خط می‌باشد.

در دو سناریو اول از این بخش، سیستم حفاظتی در مقابل اغتشاشات وارد شده عملکرد صحیح از خود نشان داده و خطوطی که در آنها خطا رخ داده را در سریع‌ترین زمان از مدار خارج می‌کند.

علاوه بر سناریوهای مذکور، سناریو ۳ حاوی رله‌ی دیستانسی است که در برابر وقوع اتصال کوتاه عمل نکرده (که می‌تواند به دلیل تنظیم نادرست رله، عدم عملکرد کلید و ... باشد) و در نتیجه، رله‌های پشتیبان محدوده‌ی بزرگتری را از مدار خارج می‌کنند.

الف: سناریو ۱

در این سناریو، در حالیکه سیستم در حالت پایدار خود قرار دارد، یک اتصال کوتاه سه فاز در خط ۲۰۳۲b-۲۰۳۱ (خط مابین شین ۲۰۳۱ و ۲۰۳۲ که نزدیک‌ترین خط به ژنراتور G08 است) در ثانیه ۱۰ رخ می‌دهد. در اثر این اغتشاش، زون ۱ رله‌های دیستانس دو انتهای خط ۲۰۳۱b-۲۰۳۱ در ثانیه ۱۰/۰۲ t عمل کرده و خط را از مدار خارج می‌کنند. سپس در لحظه t=۵۰ ژنراتور G14 (به عنوان اغتشاش دوم) از مدار خارج می‌شود. در نهایت، فروپاشی شبکه در لحظه t=۷۱/۵ s رخ می‌دهد.

کگذاری شده مشترک بین آرایه و سطر ۲ از این بانک داده، با علامت * در جدول (۳) و جدول (۴) مشخص شده‌اند.

$$\begin{cases} TNF = 8 \\ NSF_2 = 3 \end{cases} \rightarrow FSI_2 = 3/8 \times 100\% = 37.5\% \quad (5)$$

• **مرحله چهارم:** پس از محاسبه FSI_r برای تمامی سطرهای بانک داده، حداکثر مقدار بدست آمده (FSI) با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در رابطه با مثال ذکر شده، مقدار FSI به‌صورت رابطه (۷) به‌دست می‌آید.

$$FSI = \max\{FSI_r\}; r=1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$\begin{cases} FSI_1 = 50\% \\ FSI_2 = 37.5\% \\ FSI_3 = 0\% \\ FSI_4 = 37.5\% \\ FSI_5 = 37.5\% \\ FSI_6 = 0\% \end{cases} \rightarrow FSI = 50\% \quad (7)$$

• **مرحله پنجم:** FSI نشان دهنده میزان تشابه حالت فعلی شبکه (عملکرد برخط شبکه) با سطرهای بانک داده (که در همه آنها وقوع اغتشاش منجر به ناپایداری شده) است. با داشتن مقدار FSI می‌توان با استفاده از دو آستانه (TH_{Alert} و TH_{Normal}) احتمال وقوع ناپایداری را به سه حالت کم‌خطر (Low risk)، هشدار (Alert or Medium risk) و پرخطر (High risk) بیان کرد. با توجه به شبیه‌سازی‌های متعدد انجام گرفته شده در شبکه Nordic32، مقدار بهینه برای آستانه‌های مذکور بصورت رابطه (۸) پیشنهاد می‌شوند.

$$TH_{Normal} = 70\% \quad (8)$$

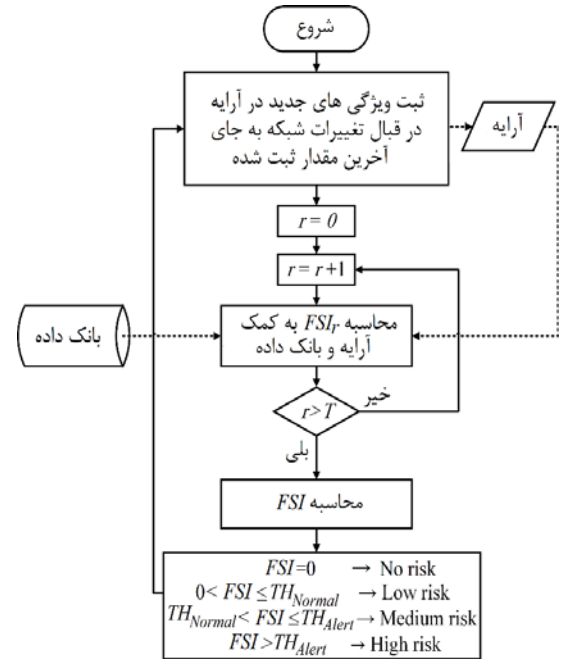
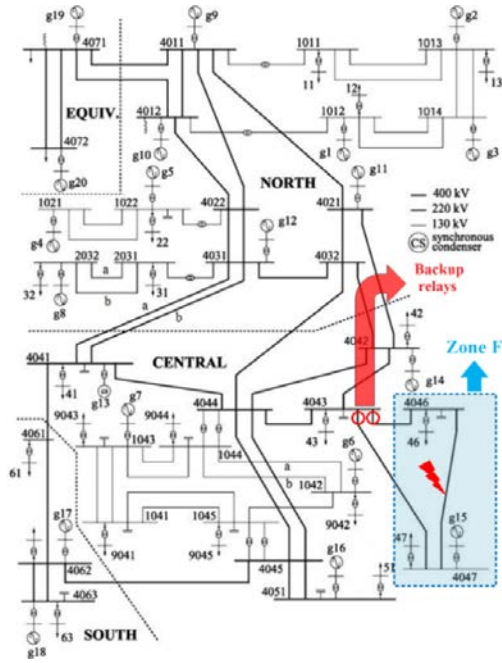
$$TH_{Alert} = 80\%$$

شکل (۵) روندنمای مراحل ذکر شده در بالا را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

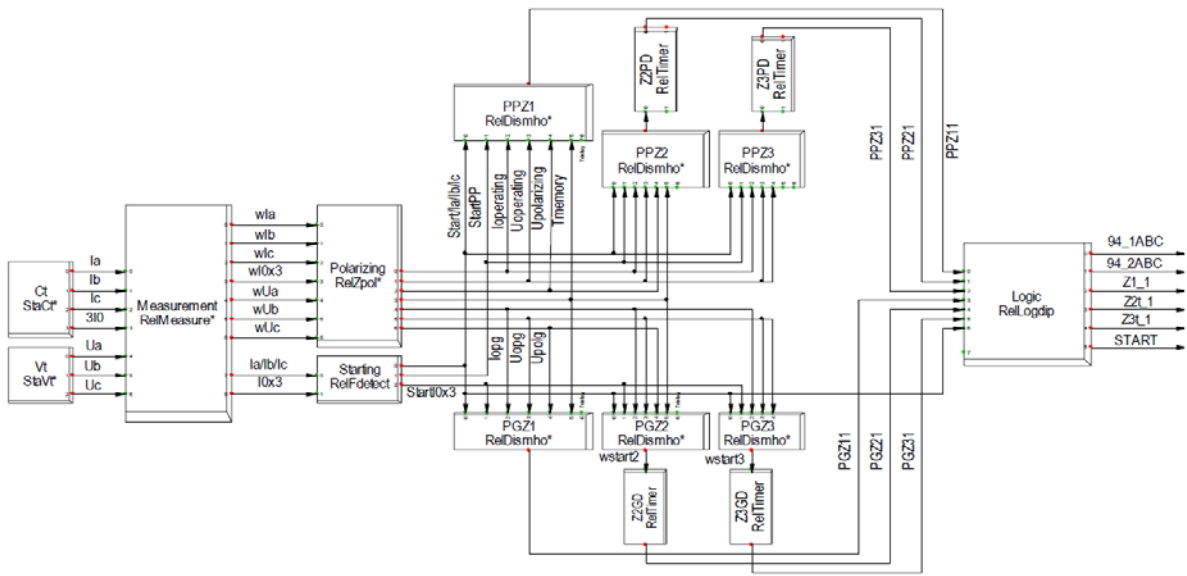
در این بخش، الگوریتم ارائه شده در شبکه Nordic32 که در شکل (۶) نشان داده شده، شبیه‌سازی شده است و سناریوهای مختلف بر روی آن اجرا می‌شود. در تشکیل بانک داده مربوط به این شبکه، از بیش از ۳۰۰ سناریو استفاده شده و حالت‌های مختلف در آن لحاظ شده است. لازم به ذکر است که سناریوهای استفاده شده برای تشکیل بانک داده با سناریوهای شبیه‌سازی شده که در ادامه ارائه شده‌اند، متفاوت می‌باشند.

همچنین قابل ذکر است که در مدل‌سازی این شبکه، با استفاده از مدل‌های آماده رله‌های صنعتی که در نرم‌افزار PowerFactory موجود است، رله‌های دیستانس و اضافه جریان (برای محافظت خطوط و ژنراتورها، شکل ۷)، رله‌های دیفرانسیلی (برای محافظت ترانسفورماتورها، شکل ۸) و همچنین رله‌های اضافه/کاهش ولتاژ و فرکانس (شکل ۹) مدل‌سازی شده است. همچنین، مدل درجه ۶ ژنراتورها، کنترل‌کننده‌های ژنراتور (AVR نوع IEEE-T1 [۳۲]، گاورنر نوع IEEE-G1 [۳۳]، و PSS)

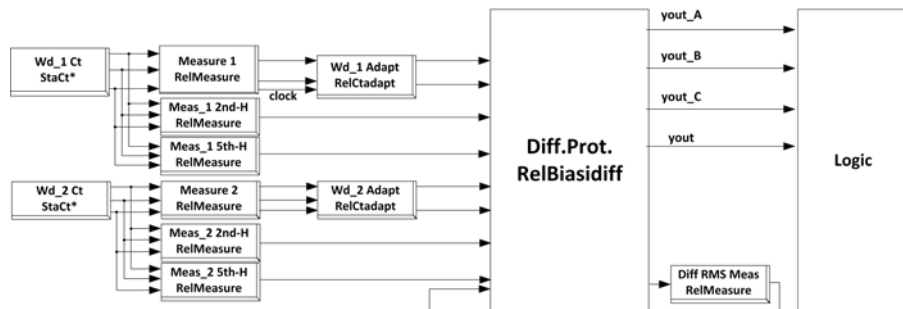


شکل ۶. شبکه استاندارد Nordic32 [۳].

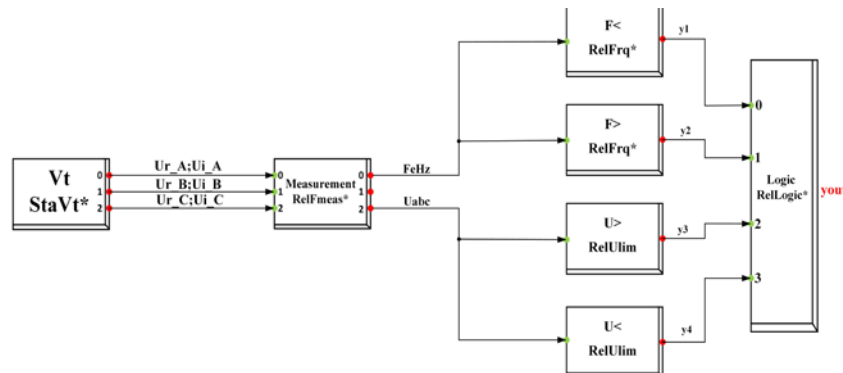
شکل ۵. روندنمای الگوریتم ارائه شده به منظور پیش‌بینی وضعیت پایداری سیستم.



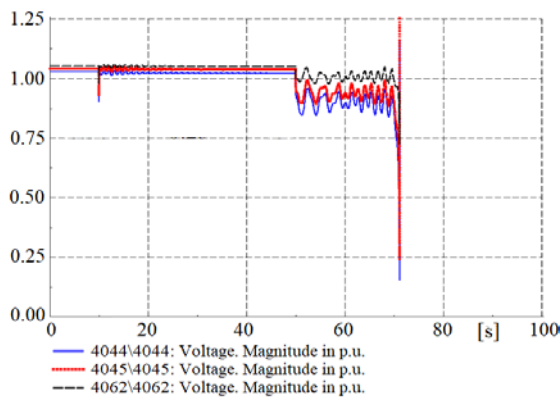
شکل ۷. بلوک دیاگرام رله دیستانس استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها.



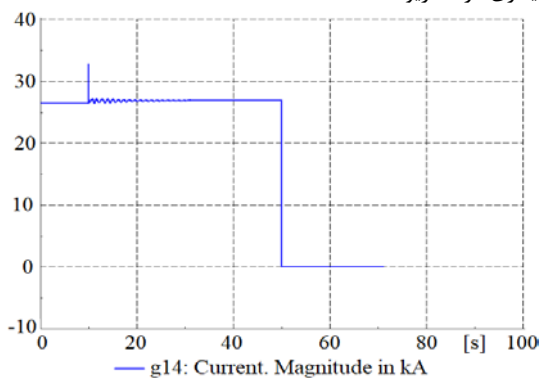
شکل ۸. بلوک دیاگرام رله دیفرانسیلی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها.



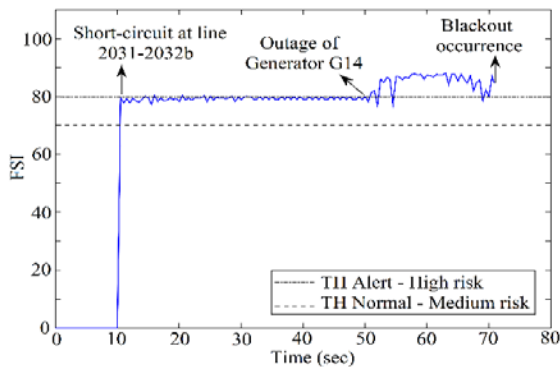
شکل ۹. بلوک دیاگرام رله ولتاژ/فرکانس استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها.



شکل ۱۰. تغییرات ولتاژ سه شین از شبکه در مقابل اغتشاشات و وقوع ناپایداری در سناریو ۱.



شکل ۱۱. تغییرات جریان ژنراتور G14.



شکل ۱۲. عملکرد الگوریتم ارائه شده در سناریو ۱.

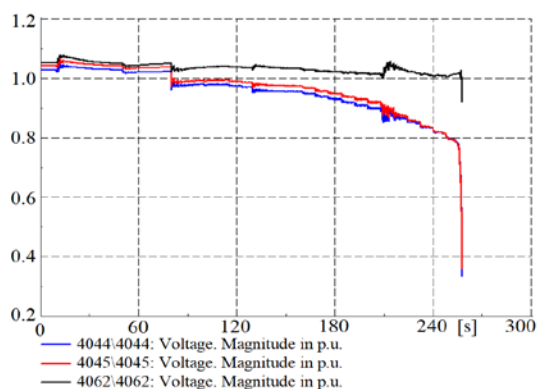
در شکل (۱۰) تغییرات ولتاژ چند شین از شبکه و فروپاشی سیستم طی شبیه‌سازی دینامیکی نشان داده شده است. همچنین، جریان ژنراتور G14 نیز در شکل (۱۱) قابل مشاهده است که با قطع ژنراتور، جریان آن نیز صفر می‌شود.

نتیجه حاصل از پیاده‌سازی روش ارائه شده در این سناریو در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، قبل از وقوع اتصال کوتاه ($t < 10s$) هیچ‌گونه احتمال فروپاشی شبکه وجود ندارد. پس از وقوع اتصال کوتاه که منجر به خروج خط ۲۰۳۱-۲۰۳۲b با شارش توان ۲۷۰ MVA می‌شود، *FSI* محاسبه شده توسط الگوریتم پیشنهاد داده شده به‌طور ناگهانی به بیش از ۷۰٪ TH_{Normal} ="خطر متوسط" (Medium risk) نمایش داده می‌شود. سپس، در ثانیه $t=50$ با خروج ژنراتور، *FSI* شروع به افزایش کرده و پس از ۲ ثانیه با گذر از $TH_{Alert} = 80\%$ ، "خطر زیاد" (High risk) نمایش داده می‌شود. در نتیجه، الگوریتم توانسته است وقوع فروپاشی شبکه را تقریباً ۲۰ ثانیه زودتر با معیار "خطر زیاد" و ۶۰ ثانیه زودتر با معیار "خطر متوسط" پیش‌بینی کند.

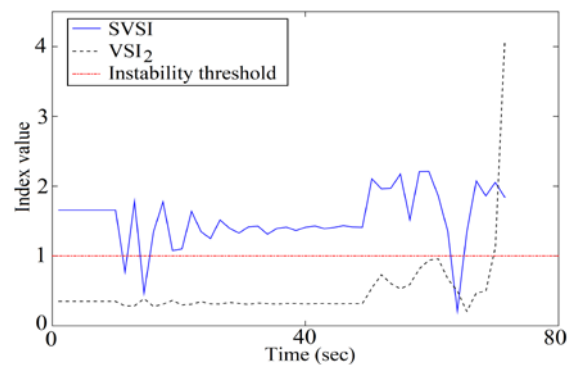
همچنین، شکل (۱۳) تغییرات گروه‌بندی چند پارامتر مربوط به توان اکتیو گذرنده از خطوط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با وقوع اغتشاش، گروه برخی از این پارامترها تغییر کرده و ضمناً، با خارج شدن خط 2031-2032b از مدار (عدم شارش توان از آن) گروه آن صفر می‌شود. شکل (۱۴) نیز عملکرد دو شاخص *SVSI* و *VSI2* را در این سناریو نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این دو شاخص با در نظر گرفتن ادوات حفاظتی و شرایط دینامیکی شبکه، پاسخ مطلوبی از خود نشان نداده‌اند (همانطور که اشاره شد، انتظار می‌رود مقدار این دو شاخص در لحظه وقوع ناپایداری به ۱ برسد).

شکل (۱۷) عملکرد دو شاخص $SVSI$ و VSI_2 در این سناریو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پاسخ این دو شاخص در این سناریو نیز نامطلوب است.

در جدول (۵) زمان وقوع شرایط Low Risk، Medium Risk و High Risk به ازای آستانه‌های متفاوت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج این جدول نشان می‌دهند که مقدار آستانه‌های TH_{Alert} و TH_{Normal} در زمان تشخیص ناپایداری (T_D) تاثیرگذار خواهند بود. از اینرو لازم است که مقدار این آستانه‌ها با توجه به تاثیر وقوع اغتشاش‌های مختلف در نقاط کار متفاوت انتخاب شود تا فرصت کافی برای اپراتورهای سیستم قدرت به منظور مقابله با ناپایداری فراهم شود.

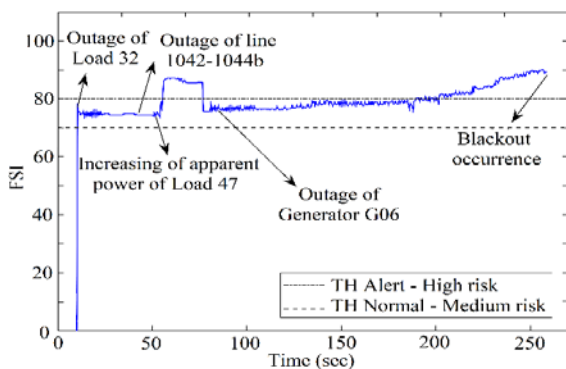


شکل ۱۳. تغییرات گروه مربوط به داده‌ها در اثر وقوع اغتشاشات در سناریو ۱.

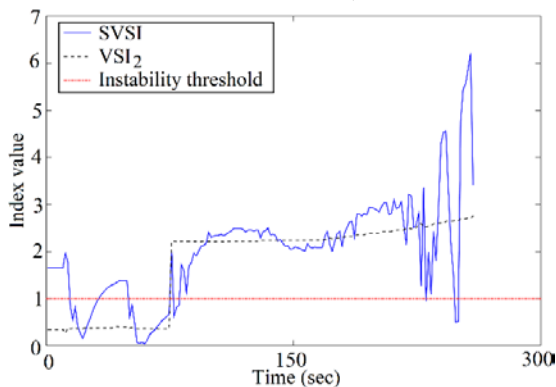


شکل ۱۴. عملکرد نامطلوب شاخص $SVSI$ و شاخص VSI_2 در پیش‌بینی وضعیت پایداری شبکه در سناریو ۱.

شکل ۱۵. تغییرات ولتاژ سه شین از شبکه در مقابل اغتشاشات و وقوع ناپایداری در سناریو ۲.



شکل ۱۶. عملکرد الگوریتم ارائه شده مربوط به سناریو ۲.

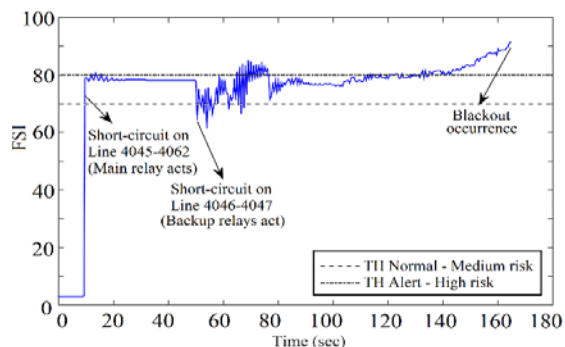


شکل ۱۷. عملکرد نامطلوب شاخص $SVSI$ و شاخص VSI_2 در پیش‌بینی وضعیت پایداری شبکه در سناریو ۲.

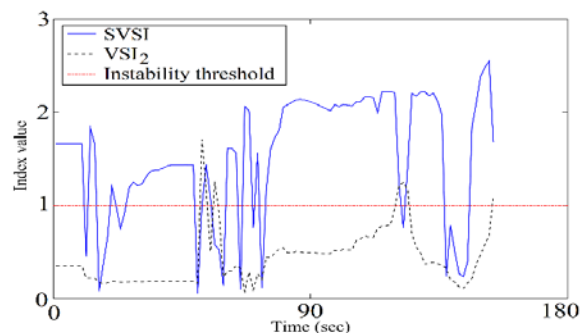
ب: سناریو ۲

هدف از این سناریو وارد کردن چندین اغتشاش متفاوت و بررسی عملکرد الگوریتم است. برای اینکار، ابتدا در ثانیه $t=10$ بار ۳۲ (بعنوان نزدیک‌ترین بار به ژنراتور $G08$) از مدار خارج می‌شود. سپس، خط $1042-1044b$ در ثانیه $t=40$ خارج می‌شود. پس از 10 ثانیه ($t=50$) توان ظاهری بار 47 (کم مصرف‌ترین بار ناحیه مرکزی) 250% افزایش می‌یابد. بعنوان آخرین اغتشاش نیز ژنراتور $G06$ که در مرکز ناحیه مرکزی قرار دارد، در ثانیه $t=75$ قطع می‌شود. شکل (۱۵) نشان می‌دهد که اغتشاشات وارد شده سبب می‌شوند تا سیستم در $t=260s$ پایداری خود را از دست دهد.

شکل (۱۶) نشان دهنده عملکرد روش ارائه شده در این شبیه‌سازی است. پس از افزایش $2/5$ برابری توان ظاهری بار 47 ، FSI بسیار افزایش یافته و شرایط "پرخطر" اعلام می‌شود. با این حال، پس از گذشت 25 ثانیه، نوسانات حاصل از این اغتشاش میرا شده و شبکه به حالت "خطر متوسط" باز می‌گردد. در نهایت مشاهده می‌شود که الگوریتم ارائه شده در پیش‌بینی وضعیت پایداری شبکه بطور مطلوب عمل کرده و فروپاشی سیستم را تقریباً یک دقیقه زودتر (با اعلام شرایط "پرخطر") تخمین زده است.



شکل ۱۹. عملکرد الگوریتم ارائه شده مربوط به سناریو ۳.



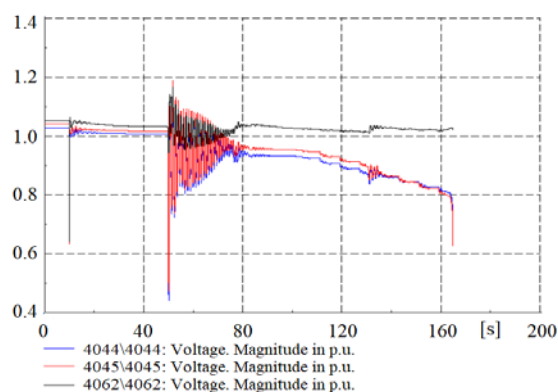
شکل ۲۰. عملکرد نامطلوب شاخص شین SVSI و شاخص VSI2 در پیش‌بینی وضعیت پایداری شبکه در سناریو ۳.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی نوین به منظور ارزیابی پایداری سیستم‌های قدرت در حضور سیستم حفاظتی ارائه شد. ضرورت و اهمیت الگوریتم ارائه شده در آن است که تجهیزات حفاظتی یک سیستم مانند رله‌های دیستانس، دیفرانسیلی و غیره، نقش بسیار مهمی در وضعیت پایداری سیستم ایفا می‌کنند و ممکن است که پس از وقوع اغتشاش، به دلیل عدم عملکرد صحیح سیستم حفاظتی، شرایط به طور ناگهانی به جای N-1 تبدیل به N-k شود و احتمال وقوع ناپایداری تغییر قابل توجهی کند. بنابراین، بررسی پایداری یک شبکه قدرت باید در حضور سیستم حفاظتی صورت گرفته و عملکرد آنها در شبیه‌سازی‌های حوزه زمان لحاظ شود. بر این اساس، هدف از این کار تحقیقاتی، ارائه روشی برای ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ شبکه دینامیکی است تا به کمک آن بتوان وضعیت پایداری ولتاژ شبکه قدرت در حضور رله‌های حفاظتی را ارزیابی کرد. نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی‌های ارائه شده، نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهاد شده توانسته است با دقت مناسب رفتار دینامیکی سیستم و وضعیت پایداری ولتاژ شبکه قدرت را در برابر اغتشاش‌های مختلف و همچنین در حضور تجهیزات حفاظتی ارزیابی نماید. همچنین، این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده می‌تواند وقوع ناپایداری در سیستم را چندین ثانیه تا چند دقیقه زودتر و با دقت مطلوب پیش‌بینی کند و از اینرو فرصت کافی برای اپراتورهای سیستم قدرت جهت اجرای اقدامات اصلاح‌کننده و جلوگیری از فروپاشی شبکه را فراهم خواهد کرد.

جدول ۵. تاثیر تغییر آستانه‌های TH_{Alert} و TH_{Normal} بر زمان تشخیص ناپایداری (T_D) در سناریو ۲.

T_D High Risk	T_D Medium Risk	TH_{Normal}	TH_{Alert}
۵۴ s	۱۰ s	۶۵ %	۷۵ %
۱۹۰ s	۱۰ s	۷۰ %	۸۰ %
۲۳۰ s	۱۰ s	۷۵ %	۸۵ %
۲۳۰ s	۱۰ s	۶۵ %	۸۵ %



شکل ۱۸. تغییرات ولتاژ سه شین از شبکه در مقابل اغتشاشات و وقوع ناپایداری در سناریو ۳.

(ج): سناریو ۳

هدف از این سناریو، بررسی عملکرد الگوریتم در شرایط عدم عملکرد صحیح رله‌ی دیستانس اصلی به ازای یک اتصال کوتاه در شبکه و سپس عملکرد رله‌های پشتیبان است. برای اینکار، ابتدا یک اتصال کوتاه سه‌فاز به خط ۴۰۶۲-۴۰۴۵ در لحظه $t=10$ s اعمال می‌شود که رله‌ی دیستانس مربوط به این خط به درستی عمل کرده و خط را از مدار خارج می‌کند.

سپس، در لحظه $t=50$ s یک اتصال کوتاه سه‌فاز دیگر در خط ۴۰۴۶-۴۰۴۷ رخ می‌دهد و این‌بار رله‌ی اصلی (که در دو انتهای این خط قرار دارند) عمل نکرده و در نتیجه رله‌های دیستانس پشتیبان در خطوط ۴۰۴۳-۴۰۴۶ و ۴۰۴۳-۴۰۴۷ عمل کرده و بخش بزرگتری از مدار را از شبکه جدا می‌سازند. در عین حال، به دلیل نزدیک بودن اتصال کوتاه به ژنراتور G15، رله اضافه جریان این ژنراتور نیز عمل می‌کند. در شکل (۶) منطقه‌ی جدا شده از شبکه (Zone F) در اثر رله‌های مذکور نشان داده شده است. در نتیجه این اغتشاش‌ها شبکه در لحظه $t=164$ s دچار فروپاشی می‌شود که در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

شکل (۱۹) نیز نشان دهنده عملکرد الگوریتم ارائه شده در این پژوهش است که توانسته است وقوع ناپایداری را در حدود ۳۵ ثانیه زودتر (با اعلام شرایط "پرخطر") پیش‌بینی نماید. همچنین، با توجه به شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که هر دو شاخص SVSI و VSI_2 قادر به ارزیابی وضعیت پایداری شبکه در قبال عملکرد نامطلوب سیستم حفاظتی نیستند.

۵- مر جع ها

- [18] Balamourougan, V.; Sidhu, T.; Sachdev, M. "Technique for Online Prediction of Voltage Collapse"; IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution 2004, 151, 453-460.
- [19] Jain, R.; Darshan, B. "Line Stability Indices and Contingency Screening by Sensitivity Factors Based Static Voltage Stability Study"; Springer, 2019, 129-138.
- [20] Ratra, S.; Tiwari, R.; Niazi, K. "Voltage Stability Assessment in Power Systems Using Line Voltage Stability Index"; Elsevier, Computers and Electrical Engineering, 2018.
- [21] Musirin, I.; Rahman, T. "Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System"; Int. Conf. Research and Development SCORED. 2002, 265-268.
- [22] Yari, S.; Khoshkhou, H. "A Comprehensive Assessment to Propose an Improved Line Stability Index"; Int. Trans. Electr. Energ. Syst. 2019. <https://doi.org/10.1002/etep.2806>.
- [23] Modarresi, J.; Gholipour, E.; Khodabakhshian, A. "A Comprehensive Review of the Voltage Stability Indices"; Renew. Sust. Energ. Rev. 2016, 63, 1-12.
- [24] Chattopadhyay, T. K.; Banerjee, S.; Chanda, C. K. "Impact of Distributed Generator on Voltage Stability Analysis of Distribution Networks Under Critical Loading Conditions for Composite Loads"; Proc. Int. Conf. Electronics, Communication and Instrumentation 2014, 1-4.
- [25] Haque, M. "On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System within Voltage Stability Limits"; IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. 2003, 150, 107-112.
- [26] Khoshkhou, H.; Shahrtash, S. "On-line Dynamic Voltage Instability Prediction Based on Decision Tree Supported by a Wide-area Measurement System"; IET Generation, Transmission & Distribution. 2012, 6, 1143-1152.
- [27] Khoshkhou, H.; Shahrtash, S. "Fast Online Dynamic Voltage Instability Prediction and Voltage Stability Classification"; IET Generation, Transmission & Distribution. 2014, 8, 957-965.
- [28] Xu, Y. "Assessing Short-term Voltage Stability of Electric Power Systems by a Hierarchical Intelligent System"; IEEE Trans. Neural Networks and Learning Systems 2016, 27, 1686-1696.
- [29] Parizad, A.; Khoshkhou, H.; Dehgan, S.; Moradtabal, R. "An Intelligent Load and Generation Shedding Procedure in an Islanded Network Using a Smart Power Management System"; Int. Conf. on Smart Grid Conference 2017.
- [30] Zhang, Y.; Xu, Y.; Yang Dong, Zh.; Zhang, R. "A Hierarchical Self-Adaptive Data-Analytics Method for Real Time Power System Short-term Voltage Stability Assessment"; IEEE Trans. Power Systems. 2019, 15, 1, 74-84.
- [31] Florin, C.; Van Cutsem, T. "Evaluation of Reactive Power Reserves with Respect to Contingencies"; Int. Workshop on Bulk Power System Dynamics and Control 2001.
- [32] IEEE Working Group. "IEEE Guide for Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems"; IEEE Std 421.2-2014.
- [33] Report, IEEE Committee. "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies"; IEEE Trans. Power Apparatus and Systems 1973, 6, 1904-1915.
- [1] Kundur, P.; Paserba, j.; Ajarapu, V.; Andersson, G. "Definition and Classification of Power System Stability"; IEEE Trans. Power Systems 2004, 19, 1387-1401.
- [2] Siavash, Y.; Khoshkhou, H.; Asadi, E. "A Novel Special Protection System to Prevent Long-Term Voltage Instability against Graffite Attacks"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2020, 4, 403-414 (In Persian).
- [3] Morison, G.; Gao, K.; Kundur, P. "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches"; IEEE Trans. Power Systems. 1993, 1159-1171.
- [4] Zeng, Y.; Berizzi, G.; Marannino, P. "Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model"; IEE Int. Conf. Advances in Power System Control, Operation and Management 1997, 396-401.
- [5] Monirul, I.; Nadarajah, M.; Hossain, J. "Dynamic Behavior of Transformerless PV System on the Short-term Voltage Stability of Distribution Network"; IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017.
- [6] Eremia, M.; Shahidehpour, M. "Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability and Control"; John Wiley & Sons. 2013.
- [7] Sanaye-Pasand, Majid. "Scrutiny of the Iranian National Grid"; IEEE Power and Energy Magazine 2016, 5, 31-39.
- [8] Aliyan, E. "Decision Tree Analysis to Identify Harmful Contingencies and Estimate Blackout Indices for Predicting System Vulnerability"; Electric Power Systems Research 2020, 178.
- [9] Glavic, M.; Van Cutsem, T. "Wide-area Detection of Voltage Instability from Synchronized Phasor Measurements"; IEEE Trans. Power Systems 2009, 24, 1408-1416.
- [10] Konar, S.; Chatterjee, D.; Patra, S. "Sensitivity-based Index for Assessment of Dynamic Voltage Stability of Power Systems"; IET Generation, Transmission & Distribution 2015, 7, 677-685.
- [11] Gao, B.; Morison, G.; Kundur, P. "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis"; IEEE Trans. Power Systems 1992, 7, 1529-1542.
- [12] Guimarães, P.; Fernandez, U.; Ocariz, T.; Mohn, F.; de Souza, A. "QV and PV Curves as a Planning Tool of Analysis"; Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. 2011, 1601-1606.
- [13] Almeida, A.; De Lorenci, E.; Leme, R.; De Souza, A.; Lopes, B.; Lo, K. "Probabilistic Voltage Stability Assessment Considering Renewable Sources with the Help of the PV and QV Curves"; IET Renewable Power Generation 2013, 7, 521-530.
- [14] Pérez-Londoño, S.; Rodríguez, L.; Olivar, G. "A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)"; International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014, 63, 806-813.
- [15] Haque M. H. "Use of Local Information to Determine the Distance to Voltage Collapse"; Proc. Int. Power Engineering Conference 2007, 12, 407.
- [16] Verbic, G.; Gubina, F. "A New Concept of Voltage-Collapse Protection Based on Local Phasor"; IEEE Trans Power Deliv. 2004, 81-576.
- [17] Smon, I.; Verbic, G.; Gubina. "Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem"; IEEE Trans Power Sys. 2006, 75-1267.