Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 2 – Summer 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

A Frequency-Domain Differential Protection Scheme Based on Discrete Laplace Transform Considering the Effects of Voltage and Current Transformers in Transmission Lines

Ehsan Akbari[1], ***Assistant professor***

[1] Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.
e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract:
Traditional differential protection schemes, which are generally implemented based on time-domain modeling, exhibit poor performance under frequency deviations caused by the frequency responses of voltage and current transformers in transmission networks. As a result, they often show significant errors in fault detection and in distinguishing between internal and external faults in practical applications. To address this challenge, this paper proposes a novel protection scheme based on the frequency characteristics of transmission lines while considering the effects of voltage and current transformers. In the proposed scheme, the transient components of voltage and current at the transmission line terminals are measured and, through modal transformation and discrete Laplace transform, the differential and complex frequency-domain components are extracted. These components are then used for fault detection and for distinguishing between internal and external faults. The proposed protection scheme is characterized by its independence from power level, sensitivity to high-impedance faults, low sampling rate requirement, and low computational burden. Simulation studies in MATLAB validate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Differential protection scheme, Discrete Laplace transform, Voltage and current transformers, Transmission line frequency characteristics.

Received: 3 May 2025
Revised: 10 June 2025
Accepted: 16 July 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Ehsan Akbari

Citation: E. Akbari, "A Frequency-Domain Differential Protection Scheme Based on Discrete Laplace Transform Considering the Effects of Voltage and Current Transformers in Transmission Lines", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 35-59, September 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]

مقاله پژوهشی

یک الگوی حفاظت دیفرانسیل حوزه فرکانس مبتنی بر تبدیل لاپلاس گسسته با در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان در خطوط انتقال

احسان اکبری[1]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده: مدل‌های حفاظت دیفرانسیل سنتی که عموماً بر اساس مدل‌سازی حوزه زمان پیاده‌سازی می‌شدند، تحت شرایط انحراف فرکانس ناشی از تغییرات پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان شبکه انتقال، عملکرد ضعیفی داشتند. به همین دلیل در کاربردهای واقعی خطای قابل‌توجهی را در تشخیص خطا و تفکیک خطاهای داخلی و خارجی نشان می‌دادند. به‌منظور حل این چالش، در این مقاله یک الگوی حفاظتی جدید بر اساس مشخصه‌های فرکانسی خط انتقال با در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان ارائه می‌شود. در الگوی پیشنهادی، مؤلفه‌های حالت گذرای ولتاژ و جریان در ترمینال‌های خط انتقال اندازه‌گیری شده و با اعمال تبدیل مدال و لاپلاس گسسته، به ترتیب مؤلفه‌های تفاضلی و مختلط حوزه فرکانس از آن‌ها استخراج می‌گردد. این مؤلفه‌ها در ادامه به‌منظور تشخیص خطا و تفکیک خطاهای داخلی و خارجی استفاده می‌شود. عدم وابستگی به سطح توان، حساسیت به خطا با امپدانس بالا، نرخ نمونه‌برداری پایین و بار محاسباتی کم از ویژگی‌های الگوی حفاظت پیشنهادی است. مطالعات شبیه‌سازی در محیط **MATLAB** تأییدکننده این ادعا است.

کلمات کلیدی: الگوی حفاظت دیفرانسیل، تبدیل لاپلاس گسسته، ترانسفورماتور ولتاژ و جریان، مشخصه فرکانسی خط انتقال.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۲۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر احسان اکبری
نشانی نویسنده مسئول: بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۱- مقدمه

شبکه‌های انتقال توان به‌طور مداوم در حال گسترش‌اند و این توسعه با پیچیده‌تر شدن ساختار آن‌ها، چالش‌های متعددی را در زمینه‌هایی نظیر حفاظت پیشرفته خطوط انتقال، پایداری سیستم قدرت، پایداری ولتاژ و کیفیت توان به همراه دارد. این مسائل با افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌کارگیری تجهیزات مبتنی بر مبدل‌های قدرت، و حضور بارهای غیرخطی شدت بیشتری می‌یابند [۱]. در روش‌های سنتی، رله‌های فاصله برای آشکارسازی خطا در خطوط انتقال به کار گرفته می‌شوند، اما این رله‌ها اغلب با محدودیت‌هایی همچون عملکرد نادرست در برابر نوسانات توان، تغییرات ناگهانی بار و وقوع خطاهای با امپدانس بالا مواجه هستند [۲]. برای غلبه بر این چالش‌ها، پژوهشگران و مهندسان رویکردهای نوینی مبتنی بر پردازش سیگنال پیشرفته و روش‌های هوشمند را جهت بهبود آشکارسازی خطا و استراتژی‌های حفاظتی توسعه داده‌اند. به عنوان نمونه، در [۳] یک روش مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنی (CNN[۱]) برای آشکارسازی و دسته‌بندی خطاها در خطوط انتقال پیشنهاد شده است که از پردازش تصویر سری‌های زمانی برای استخراج ویژگی‌ها بهره می‌گیرد. تبدیل موجک گسسته (DWT[۲]) نیز به‌طور گسترده برای حذف نویز از سیگنال‌های ولتاژ و جریان در هنگام وقوع خطا به کار رفته است. همچنین در [۴] روشی مبتنی بر امواج سیار (TW[۳]) برای آشکارسازی، مکان‌یابی و شناسایی بخش‌ها و فازهای خطادار در خطوط موازی یک‌سویه مجهز به جبران‌ساز استاتیکی (STATCOM[۴]) ارائه شده است[۳۰].

روش‌های دیگری همچون الگوریتم حفاظتی مبتنی بر سری تیلور همراه با آستانه‌گذاری تطبیقی [۵]، مدل‌های یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه‌های عصبی بازگشتی (DRNN[۵]) [۶]، و تکنیک‌های بهینه‌سازی با استفاده از ضرایب انتقال و تضعیف امواج ولتاژ و جریان [۷]، به‌منظور بهبود آشکارسازی و مکان‌یابی خطا پیشنهاد گردیده‌اند. افزون بر این، استفاده از ضرایب همبستگی جریان [۸]، منطق فازی [۹]، و سایر روش‌های هوشمند برای شناسایی انواع مختلف خطا در خطوط انتقال نتایج امیدبخشی را نشان داده است. به‌طور کلی، روش‌های پردازش سیگنال موجود برای آشکارسازی و مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال را می‌توان در سه دسته روش‌های امپدانسی، روش‌های مبتنی بر مؤلفه‌های فرکانس بالا، و روش‌های دانش‌محور طبقه‌بندی کرد [۱۰]. در میان این دسته‌ها، روش‌های امپدانسی که عمدتاً بر داده‌های موجود متکی هستند، به دلیل محدودیت اطلاعات موجود، نیازمند بهره‌گیری از تکنیک‌های استخراج ویژگی مانند تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA[۶]) [۱۱] و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA[۷]) [۱۲] هستند. همچنین، استفاده از تبدیلات ریاضی پیشرفته همچون تبدیل والش-هادامارد (WHT[۸]) [۱۳]، تبدیل فوریه سریع (FFT[۹]) [۱۴]، تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT[۱۰]) [۱۵] و تبدیل استاکول (ST[۱۱]) [۱۶] نقش مهمی در ارتقای دقت آشکارسازی و مکان‌یابی خطا ایفا کرده‌اند. با این حال، هر یک از این تبدیلات با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند؛ برای مثال، تبدیل والش-هادامارد صرفاً به جریان اندازه‌گیری‌شده در پایانه‌ها وابسته است، در حالی‌که تبدیل فوریه بیشتر برای آشکارسازی بخش‌های خطادار نزدیک به پایانه‌ها کاربرد دارد[۲۹]. از سوی دیگر، تبدیل هیلبرت-هوانگ با وجود توانایی در آشکارسازی و طبقه‌بندی خطاها، با مشکلاتی نظیر اثرات مرزی و اختلاط مد مواجه است [۱۷]. در این میان، تبدیل موجک (WT[۱۲]) به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند پردازش سیگنال برای آشکارسازی و طبقه‌بندی خطا در خطوط انتقال شناخته می‌شود، چرا که امکان تحلیل هم‌زمان سیگنال‌ها در حوزه زمان و فرکانس را فراهم می‌سازد [۱۸]. در میان انواع مختلف موجک‌ها، موجک گابور (GW[۱۳]) به دلیل قابلیت چندرزولوشنی و توانایی در استخراج ویژگی از سیگنال‌های پیچیده و غیرایستا، جایگاه ویژه‌ای یافته است [۱۹]. با این وجود، عملکرداین روش به شدت به انتخاب مناسب پارامترها (ازجمله اندازه پنجره و مقیاس‌ها) وابسته است و درصورت تنظیم نادرست می‌تواند منجر به کاهش دقت در آشکارسازی خطا شود. علاوه براین ، اجرای موجک گابور باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی می‌گردد و این امر استفاده از آن را در کاربردهای برخط بامحدودیت مواجه می‌سازد[۲۰].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

همچنین این روش وابستگی بالایی به مشخصه‌های فرکانسی خط دارد، بنابراین تحت شرایط تغییر پاسخ فرکانسی تجهیزات ترانسفورماتور انحراف بالایی را نشان می‌دهد. به‌منظور حل این چالش‌ها، در این مقاله یک الگوی حفاظتی حوزه فرکانس بر مبنای تبدیل لاپلاس گسسته پیشنهاد می‌شود که با پردازش مؤلفه‌های حالت گذرای سیگنال‌های جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده روی ترمینال‌های خط، امکان تفکیک مؤلفه‌های اصلی، هارمونیکی و آفست را فراهم می‌کند. به این ترتیب، عملکرد رله در حفاظت دیفرانسیلی، تحت تأثیرجریان‌های هجومی ناشی از تغییرات پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT[۱۴]) و جریان (CT[۱۵]) قرار نخواهد گرفت. علاوه بر این، الگوی حفاظت پیشنهادی مستقل از سطح توان شبکه بوده و تحت شرایط خطای امپدانس بالا نیز حساسیت مطلوبی دارد. به دلیل بهره‌گیری از تبدیل لاپلاس گسسته برای استخراج مشخصه‌های خطا، الگوی پیشنهادی بار محاسباتی کمتری در مقایسه با تبدیل‌های رایج نظیر موجک و یا هیلبرت نشان می‌دهد، به این دلیل که همه تبدیل‌های در حوزه فرکانس انجام شده و نیازی به چندین سطح رزولوشن و یا تجزیه سطوح نیست. همین مسئله در کاهش نرخ نمونه‌برداری نیز تأثیرمستقیم دارد. در الگوی پیشنهادی، یک شاخص جدید تحت عنوان معیارتناسب تعریف می‌شود که مشخصه‌های وابسته به فرکانس و مشخصه‌های توزیع شده خط را در نظر می‌گیرد. به این ترتیب الگوی حفاظتی مستقل از پهنای باند فرکانسی، مشخصه‌های پاسخ فرکانسی تجهیزات تبدیل، طول خط، سرعت انتشار موج خطا و مشخصه‌های امپدانس خط انتقال است.

نوآوری‌های مقاله به شرح زیر است:

- ارائه یک الگوی حفاظت دیفرانسیلی مبتنی بر تبدیل مدال و لاپلاس گسسته در حوزه فرکانس با در نظر گرفتن اثر تغییر مشخصه‌های پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای شبکه.
- کاهش بار محاسباتی الگوی حفاظتی به دلیل بهره‌گیری از تبدیل لاپلاس مختلط به‌جای سایر تبدیل‌های ریاضی مبتنی بر تجزیه سیگنال.
- عدم حساسیت الگوی حفاظتی به سطح توان شبکه انتقال، پهنای باند فرکانسی، مشخصه‌های پاسخ فرکانسی CT و VT، طول خط، سرعت انتشار موج خطا و مشخصه‌های امپدانس خط.

ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی می‌شود. در بخش دوم، مدل‌سازی مشخصه‌های فرکانسی تجهیزات CT و VT، مدل‌سازی خط انتقال تحت شرایط خطای داخلی و خارجی، و روابط ریاضی مربوطه ارائه می‌گردد. بخش سوم، به تشریح مدل حفاظت پیشنهادی و تعریف معیار تناسب اختصاص دارد. شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری و تحلیل نتایج تحت سناریوهای مختلف در بخش چهارم انجام شده و در نهایت مقاله در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- مدل‌سازی خط انتقال و تجهیزات تبدیل

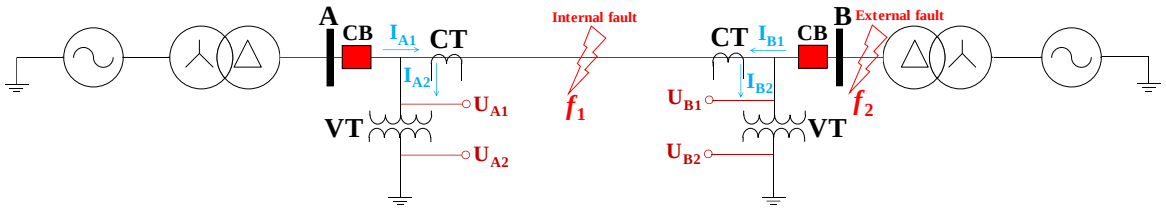
در این بخش، ابتدا مدل خط انتقال مورد مطالعه ارائه شده و انواع خطاهای داخلی و خارجی در این سیستم معرفی می‌شوند. همچنین به‌منظور بررسی اثر پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهایCT و VT روی عملکرد الگوی حفاظت، ابتدا می‌بایست توابع انتقال این تجهیزات استخراج شوند. در نهایت نیز مدل مدال معادل خط انتقال تحت شرایط خطای داخلی و خارجی معرفی خواهد شد.

۲-۱- مدل خط انتقال

خط انتقال مورد مطالعه در این مقاله، یک خط انتقال بلند به طول l است که در دو انتهای آن تجهیزات حفاظتی قطع کن (CB[۱۶]) نصب شده است. ترمینال‌های ابتدا و انتهای خط به ترتیب با A و B نمایش داده شده‌اند. ولتاژ و جریان اولیه در ترمینال

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

A به ترتیب با U_{A1} و I_{A1} نام‌گذاری شده است، در حالی که این مؤلفه‌ها برای ترمینال B به ترتیب با U_{B1} و I_{B1} مشخص شده‌اند. مؤلفه‌های متناظر با سمت ثانویه نیز به همین روش با اندیس ۲ نشان داده شده‌اند. سیگنال‌های جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط CT و VT به‌منظور عملکرد سیستم حفاظتی توسط CBها پردازش می‌شوند. علاوه بر این، خطای داخلی که در میانه خط بین دو ترمینال و خطای خارجی که بین شبکه ac و ترمینال‌های شبکه رخ می‌دهد، از هم تفکیک شده‌اند. شکل (۱)، مدل خط انتقال مورد مطالعه را نشان می‌دهد[۲۱].



شکل (۱): مدل خط انتقال مورد مطالعه

Figure (1): Transmission line model under study

برای بررسی اثر مشخصه‌های تبدیل CT و VT روی عملکرد سیستم حفاظتی، ابتدا می‌بایست توابع انتقال این تجهیزات تعریف شوند. در زیربخش بعدی، این هدف برآورده شده است.

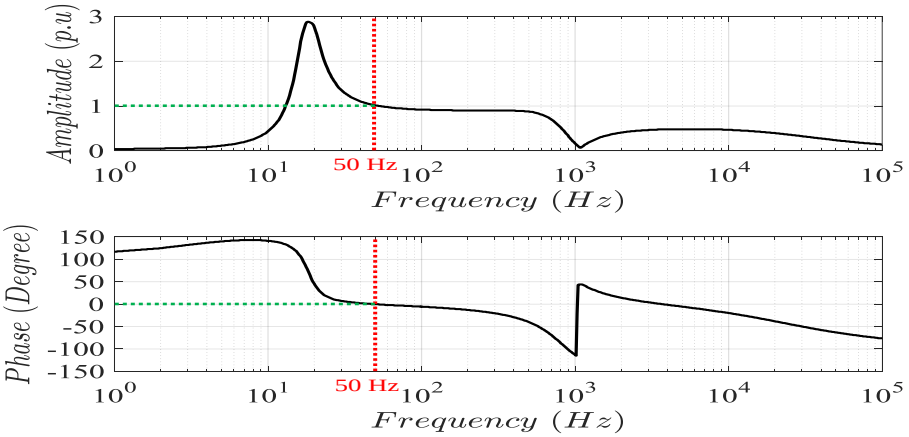
۲-۲- توابع انتقال تجهیزات تبدیل

در الگوی حفاظت پیشنهادی، معیار تناسب بر اساس مقادیر حالت گذرای ولتاژ و جریان در سمت ثانویه CT و VT محاسبه می‌شود. بنابراین تغییر مشخصه‌های تبدیل در این تجهیزات که در نتیجه تغییرات پاسخ فرکانسی را به دنبال دارد، روی این مؤلفه‌های حالت گذرا تأثیر مستقیم خواهد داشت. به همین منظور ابتدا لازم است مشخصه‌هایپاسخ فرکانسی این تجهیزات به دست آیند.

برای یک VT نوعی، تابع انتقال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_{UB}(s)=\frac{U_{B2}(s)}{U_{B1}(s)}H_{UA}(s)=\frac{U_{A2}(s)}{U_{A1}(s)} \quad (۱)$$

در این رابطه، s متغیر فرکانس مختلط است. با معادل‌سازی مدار یک VT مطابق با آنچه در [۲۱] ارائه شده است، پاسخ فرکانسی یک VT نوعی به صورت شکل (۲) به دست می‌آید. فرکانس‌های تشدید و روند تغییرات دامنه و فاز با افزایش فرکانس در این شکل نشان داده شده است.



شکل (۲): مشخصه‌های پاسخ فرکانسی یک VT نوعی

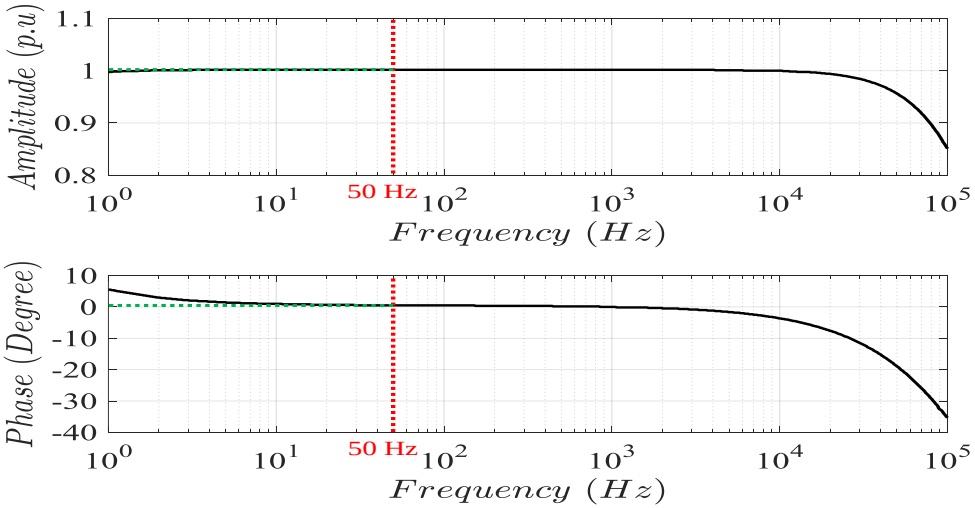
Figure (2): Frequency response characteristics of a typical VT

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

در مرحله بعد، پاسخ حالت گذرای CT محاسبه می‌شود. به این منظور از مدار معادل و مشخصه‌های فرکانسی ارائه شده در [۲۲] استفاده می‌شود. برای یک CT نوعی، تابع انتقال مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$H_{IA}(s)=\frac{I_{A2}(s)}{I_{A1}(s)},\quad H_{IB}(s)=\frac{I_{B2}(s)}{I_{B1}(s)} \qquad (۲)$$

همچنین مشخصه‌های انتقال CT در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳): مشخصه‌های پاسخ فرکانسی یک CT نوعی

Figure (3): Frequency response characteristics of a typical CT

با معلوم بودن مشخصه‌های فرکانسی VT و CT، مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده توسط این تجهیزات تحت شرایط حالت گذرای فرکانس بالا، قابل تخمین هستند. در زیربخش‌های بعدی، مدار معادل و مدل‌سازی ریاضی خطاهای داخلی و خارجی برای خط انتقال مورد مطالعه ارائه می‌گردد. پیش از استخراج مدار معادل و مدل ریاضی خط تحت شرایط خطای داخلی و خارجی، به‌منظور حذف اثر کوپلینگ بین مؤلفه‌های سه فاز جریان و ولتاژ، به کمک رابطه (۳)، این سیگنال‌ها را به مؤلفه‌های مد ۰، ۱ و ۲ تجزیه می‌کنیم[۲۲]:

$$\begin{bmatrix}V_0\\V_1\\V_2\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&-1&0\\1&0&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_a\\V_b\\V_c\end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix}I_0\\I_1\\I_2\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&-1&0\\1&0&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_a\\I_b\\I_c\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

۳-۲- مدل T برای خط انتقال بلند

در این مطالعه، مدل T به‌جای خط انتقال با مؤلفه‌های امپدانس Z' و Y' در نظر گرفته شده است. با فرض l>160km (یعنی خط انتقال بلند)، تنها پارامترهای توزیع شده خط در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین ولتاژ و جریان در سمت ارسال خط به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۳]:

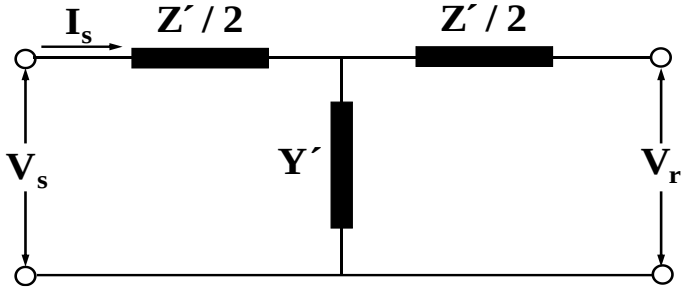
$$\begin{bmatrix}\overline{V_s}\\\overline{I_s}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A&B\\C&D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V_r}\\\overline{V_r}\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

که در آن،

$$A = D = \cosh(\gamma \mathrm{l})$$
$$\mathrm{B} = \mathrm{Z}_c \sinh(\gamma \mathrm{l}) \quad (۵)$$
$$C = \frac{1}{Z_c}\sinh(\gamma \mathrm{l})$$

در رابطه فوق، $Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$ و $\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$ به ترتیب امپدانس مشخصه و ثابت انتشار خط انتقال هستند. l نیز طول خط انتقال را برحسب km نشان می‌دهد. برای مدل T نوعی که در شکل (۴) ترسیم شده است داریم.



شکل (۴): مدل T برای یک خط انتقال بلند

Figure (4): Model T for a long transmission line

$$\overline{V}_s = \left(1+\frac{Y^{'}Z^{'}}{2}\right)\overline{V}_r + Z^{'}\left(1+\frac{Y^{'}Z^{'}}{4}\right)\overline{I}_r \quad (۶)$$
$$\overline{I}_s = Y^{'}\overline{V}_r + \left(1+\frac{Y^{'}Z^{'}}{2}\right)\overline{I}_r$$

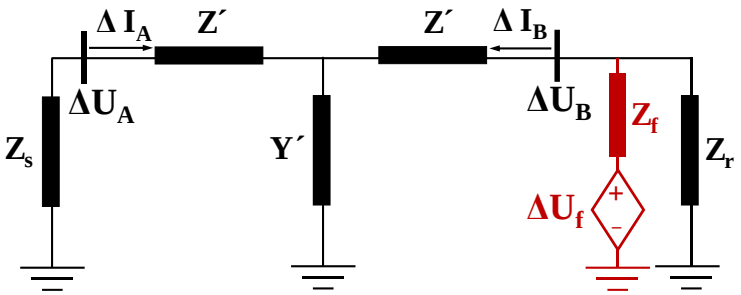
بنابراین با مقایسه روابط (۴) و (۵) با رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$Z^{'} = Z_c \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (۷)$$
$$Y^{'} = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c}$$

۴-۲- مدل‌سازی خطای خارجی

به‌منظور استخراج مدار معادل و مدل ریاضی خطای خارجی، خطای f_2 در شکل (۱) را در نظر می‌گیریم. مدار معادل سیستم خط انتقال تحت خطای خارجی f_2 در شکل (۵) ترسیم شده است [۲۴]. در این شکل، ΔU_{A} و ΔU_{B} به ترتیب مؤلفه‌های ولتاژ خطا روی ترمینال‌های A و B هستند و ΔI_{A} و ΔI_{B} مؤلفه‌های متناظر جریان خطا را روی این دو ترمینال نشان می‌دهند. Z_s و Z_r به ترتیب امپدانس معادل شبکه‌های سمت ارسال و دریافت هستند و Z_f امپدانس خطا را نشان می‌دهد. ΔU_{f} نیز منبع ولتاژ معادل در نقطه خطا را معادل‌سازی می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۵): مدار معادل خطای خارجی

Figure (5): External fault equivalent circuit

با اعمال قوانین مداری برای مدار شکل ۵، می‌توان نوشت[۲۴]:

$$\Delta U_A = Z_c \Delta I_A \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} + Z_c \Delta I_B \frac{1}{\sinh(\gamma l)} \quad (۸)$$

$$\Delta U_B = Z_c \Delta I_A \frac{1}{\sinh(\gamma l)} + Z_c \Delta I_B \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} \quad (۹)$$

با تشکیل مؤلفه‌های تجمیعی و تفاضلی ولتاژ مؤلفه خطا به کمک روابط (۸) و (۹) و را محاسبه نسبت این دو مؤلفه، خواهیم داشت:

$$\underbrace{\frac{\Delta U_A - \Delta U_B}{\Delta U_A + \Delta U_B}}_{H_{L,pri}} = \underbrace{\frac{(\cosh(\gamma l)-1)}{(\cosh(\gamma l)+1)}}_{K} \times \underbrace{\frac{(\Delta I_A - \Delta I_B)}{(\Delta I_A + \Delta I_B)}}_{H_{R,pri}} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، H_L و H_R به ترتیب مشخصه‌های انتقال سمت چپ و راست معادله هستند و K برای یک خط انتقال با پارامترهای توزیع شده، مقدار ثابتی است. نکته قابل‌توجه این است که رابطه (۱۰) برای مؤلفه‌های سمت اولیه CT و VT محاسبه شده‌اند، بنابراین با اعمال توابع انتقال VT (رابطه (۱))، مؤلفه‌های سمت ثانویه به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$H_{L,\text{sec}} = \frac{\left(\frac{\Delta U_{A2}}{H_{UA}(s)}\right) - \left(\frac{\Delta U_{B2}}{H_{UB}(s)}\right)}{\left(\frac{\Delta U_{A2}}{H_{UA}(s)}\right) + \left(\frac{\Delta U_{B2}}{H_{UB}(s)}\right)} = \frac{H_{UB}(s)\Delta U_{A2} - H_{UA}(s)\Delta U_{B2}}{H_{UB}(s)\Delta U_{A2} + H_{UA}(s)\Delta U_{B2}} \quad (۱۱)$$

$$H_{R,\text{sec}} = \frac{\left(\frac{\Delta I_{A2}}{H_{IA}(s)}\right) - \left(\frac{\Delta I_{B2}}{H_{IB}(s)}\right)}{\left(\frac{\Delta I_{A2}}{H_{IA}(s)}\right) + \left(\frac{\Delta I_{B2}}{H_{IB}(s)}\right)} = \frac{H_{IB}(s)\Delta I_{A2} - H_{IA}(s)\Delta I_{B2}}{H_{IB}(s)\Delta I_{A2} + H_{IA}(s)\Delta I_{B2}} \quad (۱۲)$$

با تعریف نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای VT و CT در ابتدا و انتهای خط به صورت زیر،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

$$\begin{cases} G_U(s) = \dfrac{H_{UA}(s)}{H_{UB}(s)} \\ G_I(s) = \dfrac{H_{IA}(s)}{H_{IB}(s)} \end{cases} \quad (۱۳)$$

و جایگذاری در روابط (۱۱) و (۱۲) خواهیم داشت،

$$H_{L,\text{sec}} = \frac{\Delta U_{A2} - G_U(s)\Delta U_{B2}}{\Delta U_{A2} + G_U(s)\Delta U_{B2}} \quad (۱۴)$$

$$H_{R,\text{sec}} = \frac{\Delta I_{A2} - G_I(s)\Delta I_{B2}}{\Delta I_{A2} + G_I(s)\Delta I_{B2}} \quad (۱۵)$$

با جایگذاری (۱۴) و (۱۵) در (۱۰) و پس از ساده‌سازی، به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$\Delta U_{A2}\Delta I_{A2} - G_U G_I \Delta U_{B2}\Delta I_{B2} - \left(G_U \Delta U_{B2}\Delta I_{B2} - G_I \Delta U_{A2}\Delta I_{A2}\right)\cosh(\gamma l) = 0 \quad (۱۶)$$

از آنجایی که در الگوی حفاظت دیفرانسیلی، CTهای نصب شده در دو انتهای خط انتقال یکسان هستند، مشخصه‌های انتقال و نسبت تبدیل آن‌ها نیز برابر خواهد بود بنابراین، $G_{\mathrm{I}} = 1$. همچنین با فرض مشخصه‌های فرکانسی مشابه VTهای نصب شده در دو سمت خط انتقال می‌توان گفت که $G_{\mathrm{V}} \approx 1$ [۲۴]. پس در نهایت داریم:

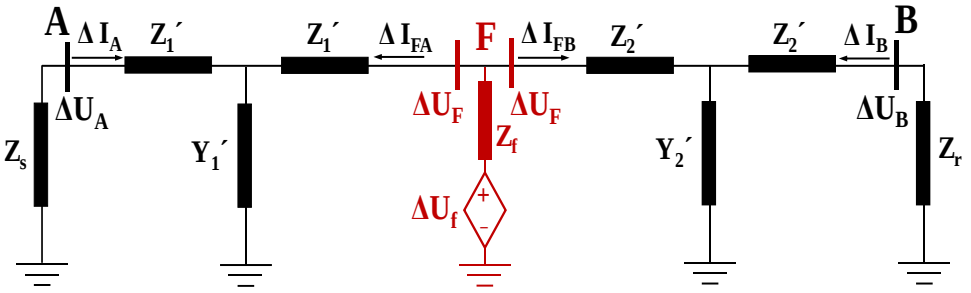
$$\underbrace{\Delta U_{A2}\Delta I_{A2} - \Delta U_{B2}\Delta I_{B2} - \left(\Delta U_{B2}\Delta I_{B2} - \Delta U_{A2}\Delta I_{A2}\right)\cosh(\gamma l)}_{congruenceCirterion\,(\mathrm{CC})} \approx 0 \quad (۱۷)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این رابطه، تنها مؤلفه‌های ثانویه تجهیزات تبدیل VT و CT وجود دارد و اثر پاسخ فرکانسی این تجهیزات نیز با ضرب تابع انتقال در مؤلفه‌های سمت اولیه در نظر گرفته شده است. رابطه (۱۷) نشان‌دهنده معیار تناسب پیشنهادی (CC[۱۷]) است که همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای خطای خارجی تقریباً صفر است. در ادامه تحلیل‌های مربوط به خطای داخلی را ارائه خواهیم داد.

۵-۲- مدل‌سازی خطای داخلی

به‌منظورمدل‌سازی خطای داخلی، خطای $\mathrm{f_1}$ را در شکل (۱) در نظر می‌گیریم. در این حالت، مدار معادل خطای داخلی به صورت شکل (۶) قابل‌استخراج است. در این شکل، ΔU_{F} ولتاژ مؤلفه خطا در نقطه بروز خطا است و ΔI_{FA} و ΔI_{FB} نیز به ترتیب جریان‌های مؤلفه خطای انتشار یافته به سمت ترمینال‌هایA و B را نشان می‌دهند. در مورد خطای داخلی، مدل T برای خط انتقال به دو مدل همسان قابل‌تفکیک است، یکی مدل خط انتقال بین ترمینال A و نقطه خطا (F) و دیگری مدل خط انتقال بین نقطه خطای F و ترمینال B. هر یک از این بخش‌ها مشابه روند مورد استفاده برای خطای خارجی، قابل مدل‌سازی و روابط آن‌هاقابل‌استخراج است. در ادامه این روابط ارائه خواهد شد[۲۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۶): مدار معادل خطای داخلی

Figure (6): Internal fault equivalent circuit

بر اساس شکل ۶ و تعمیم رابطه (۱۰) برای دو بخش مجزای خط در شرایط خطای داخلی، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta U_A-\Delta U_F}{\Delta U_A+\Delta U_F}=\frac{\left(\cosh(\gamma x)-1\right)\left(\Delta I_A-\Delta I_{FA}\right)}{\left(\cosh(\gamma x)+1\right)\left(\Delta I_A+\Delta I_{FA}\right)} \qquad (۱۸)$$

$$\frac{\Delta U_B-\Delta U_F}{\Delta U_B+\Delta U_F}=\frac{\left(\cosh(\gamma\left(l-x\right))-1\right)\left(\Delta I_B-\Delta I_{FB}\right)}{\left(\cosh(\gamma\left(l-x\right))+1\right)\left(\Delta I_B+\Delta I_{FB}\right)}$$

پس از ساده‌سازی دو رابطه (۱۸)، به دو رابطه (۱۹) می‌رسیم:

$$\begin{cases}\Delta U_A\Delta I_A-\Delta U_F\Delta I_{FA}-\left(\Delta U_F\Delta I_A-\Delta U_A\Delta I_{FA}\right)\cosh\left(\gamma x\right)=0\\ \Delta U_B\Delta I_B-\Delta U_F\Delta I_{FB}-\left(\Delta U_F\Delta I_B-\Delta U_B\Delta I_{FB}\right)\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)=0\end{cases} \qquad (۱۹)$$

اگر معادله دوم رابطه (۱۹) را از معادل اول کم کنیم، داریم:

$$\begin{aligned}\Delta U_A\Delta I_A-\Delta U_B\Delta I_B=\Delta U_F\left(\Delta I_{FA}-\Delta I_{FB}\right)+\left(\Delta U_F\Delta I_A-\Delta U_A\Delta I_{FA}\right)\cosh\left(\gamma x\right)\\ -\left(\Delta U_F\Delta I_B-\Delta U_B\Delta I_{FB}\right)\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

سپس عبارت $(\Delta U_{\mathrm{B}}\Delta I_{\mathrm{A}}-\Delta U_{\mathrm{A}}\Delta I_{\mathrm{B}})\cosh(\gamma l)$ را از دو سمت معادله (۲۰) کم می‌کنیم،

$$\begin{aligned}&\Delta U_A\Delta I_A-\Delta U_B\Delta I_B-\left(\Delta U_B\Delta I_A-\Delta U_A\Delta I_B\right)\cosh\left(\gamma l\right)=\\ &\Delta U_F\left(\Delta I_{FA}-\Delta I_{FB}\right)+\left(\Delta U_F\Delta I_A-\Delta U_A\Delta I_{FA}\right)\cosh\left(\gamma x\right)-\\ &\left(\Delta U_F\Delta I_B-\Delta U_B\Delta I_{FB}\right)\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)-\left(\Delta U_B\Delta I_A-\Delta U_A\Delta I_B\right)\cosh\left(\gamma l\right)\end{aligned} \qquad (۲۱)$$

مؤلفه‌های ولتاژ و جریان خطا در رابطه فوق برای سمت اولیه تجهیزات CT و VT به دست آمده‌اند. پس از انتقال این مؤلفه‌ها به سمت ثانویه به کمک روابط (۱) و (۲) و با تعریف مؤلفه‌های ثانویه ولتاژ و جریان در نقطه خطا به صورت $\Delta U_{\mathrm{F2}}=H_{\mathrm{UA}}\Delta U_{\mathrm{F}}$ و $\Delta I_{\mathrm{FA2}}=H_{\mathrm{IA}}\Delta I_{\mathrm{FA}},\Delta I_{\mathrm{FB2}}=H_{\mathrm{IB}}\Delta I_{\mathrm{FB}}$ و در نهایت جایگذاری نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای طبق رابطه (۱۳)، خواهیم داشت:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

$$\begin{aligned}&\Delta U_{F2}\left(\Delta I_{FA2}-\Delta I_{FB2}\right)+\left(\Delta U_{F2}\Delta I_{A2}-\Delta U_{A2}\Delta I_{FA2}\right)\cosh\left(\gamma x\right)\\&-\left(G_I\Delta U_{F2}\Delta I_{B2}-G_U\Delta U_{B2}G_I\Delta I_{FB2}\right)\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)\\&-\left(G_U\Delta U_{B2}\Delta I_{A2}-G_I\Delta U_{A2}\Delta I_{B2}\right)\cosh\left(\gamma l\right)\end{aligned}\qquad(۲۲)$$

مجدداً بر اساس قاعده حفاظت دیفرانسیلی در خطوط انتقال ($G_U \approx G_I = 1$)، رابطه (۲۲) به فرم (۲۳) ساده می‌شود:

$$\begin{aligned}&\Delta U_{F2}\left(\Delta I_{FA2}-\Delta I_{FB2}\right)+\left(\Delta U_{F2}\Delta I_{A2}-\Delta U_{A2}\Delta I_{FA2}\right)\cosh\left(\gamma x\right)\\&-\left(\Delta U_{F2}\Delta I_{B2}-\Delta U_{B2}G_I\Delta I_{FB2}\right)\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)\\&-\left(\Delta U_{B2}\Delta I_{A2}-\Delta U_{A2}\Delta I_{B2}\right)\cosh\left(\gamma l\right)\end{aligned}\qquad(۲۳)$$

در نهایت پس از ساده‌سازی و مرتب‌سازی رابطه (۲۳)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}&\Delta U_{A2}\Delta I_{A2}-\Delta U_{B2}\Delta I_{B2}-\left(\Delta U_{B2}\Delta I_{B2}-\Delta U_{A2}\Delta I_{A2}\right)\cosh\left(\gamma l\right)+\\&\frac{\Delta U_{2F}\left(\Delta I_{2FA}-\Delta I_{2FB}\right)+\Delta U_{2A}\left(\Delta I_{2B}\cosh\left(\gamma l\right)-\Delta I_{2FA}\cosh\left(\gamma x\right)\right)+\Delta U_{2B}\left(\Delta I_{2FB}\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)-\Delta I_{2A}\cosh\left(\gamma l\right)\right)}{\left(\Delta U_{2A}\Delta I_{2A}-\Delta U_{2B}\Delta I_{2B}\right)\left(1+\cosh\left(\gamma l\right)\right)}\end{aligned}\qquad(۲۴)$$

که جمله اول همان معیار تناسب CC است که در (۱۷) تعریف شده است. این بدان معنی است که:

$$\begin{aligned}&\Delta U_{A2}\Delta I_{A2}-\Delta U_{B2}\Delta I_{B2}-\left(\Delta U_{B2}\Delta I_{B2}-\Delta U_{A2}\Delta I_{A2}\right)\cosh\left(\gamma l\right)\approx\\&-\left(\frac{\Delta U_{2F}\left(\Delta I_{2FA}-\Delta I_{2FB}\right)+\Delta U_{2A}\left(\Delta I_{2B}\cosh\left(\gamma l\right)-\Delta I_{2FA}\cosh\left(\gamma x\right)+\Delta U_{2B}\left(\Delta I_{2FB}\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right)-\Delta I_{2A}\cosh\left(\gamma l\right)\right)\right)}{\left(\Delta U_{2A}\Delta I_{2A}-\Delta U_{2B}\Delta I_{2B}\right)\left(1+\cosh\left(\gamma l\right)\right)}\right)\end{aligned}\qquad(۲۵)$$

رابطه (۲۵) نشان می‌دهد که برای خطاهای داخلی، CC≠0 است در حالی که طبق رابطه (۱۷)، برای خطاهای خارجی CC≈0 خواهد بود. بنابراین به‌منظور شناسایی خطاهای داخلی و خارجی در خطوط انتقال مجهز به ترانسفورماتورهای CT و VT کافی است مؤلفه‌های ثانویه ولتاژ و جریان خطا را در این تجهیزات اندازه‌گیری کرده و معیار تناسب CC را محاسبه کنیم. با مقایسه CC با مقدار صفر، خطای داخلی یا خارجی شناسایی می‌گردد.

۶-۲- محاسبه مؤلفه‌های ولتاژ و جریان خطا

از آنجایی که مؤلفه‌های ولتاژ و جریان خطا، مؤلفه‌های حالت گذرای فرکانس بالا هستند، به‌منظوراندازه‌گیری و محاسبه آن‌ها در این مقاله از تبدیل لاپلاس گسسته استفاده می‌شود. فرض کنید ولتاژ $U_{A2}(t)$ سیگنال ولتاژ مد ۱ اندازه‌گیری شده روی ثانویه VT متصل به ترمینال A باشد. در این صورت، تبدیل لاپلاس مؤلفه ولتاژ خطا متناظر با این سیگنال، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta U_{A2}(s)=\int_0^{\infty}\left[U_{A2}(t)\,\mathrm{e}^{-\sigma t}\right]e^{-j\omega t}dt\qquad(۲۶)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

که در این رابطه، $s = \sigma + j\omega$، ω فرکانس زاویه‌ای، و σ ضریب کاهش نمایی است. با فرض انتخاب یک پنجره زمانی به طول T و تعداد نمونه‌های N از سیگنال $U_{A2}(t)$، فرم گسسته معادله (۲۶) به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta U_{A2}[n] = \frac{T}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[U_{A2}[i]e^{-\sigma i\frac{T}{N}}\right]e^{-j\frac{2\pi}{N}(in)} \quad (۲۷)$$

در این رابطه، $n=1,2,\ldots,N$ است و همچنین σ طوری انتخاب می‌شود که در انتهای پنجره زمانی، (t=T)، اثر نمونه‌ها به صفر برسد. بنابراین $\sigma = \ln(\epsilon)\frac{1}{T}$ انتخاب می‌شود که ϵ عدد کوچکی (در این مطالعه برابر$۱۰^{-۶}$) است. سایر مؤلفه‌های جریان و ولتاژ خطا در دو ترمینال شبکه به همین روش قابل‌محاسبه هستند. در بخش بعدی، الگوی حفاظت پیشنهادی تشریح می‌گردد.

۳- الگوی حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی

عملکرد الگوی حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی شامل دو مرحله است. در مرحله اول، تشخیص خطا بر اساس معیار میانگین تفاضلی مرتبه اول (FODA[۱۸]) انجام شده و در مرحله دوم، تفکیک خطای داخلی از خارجی به کمک معیار تناسب پیشنهادی انجام می‌گیرد.

۳-۱- الگوی تشخیص خطا

در این مقاله، معیار FODA به‌منظور تشخیص خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. FODA یک روش میانگین‌گیری مبتنی بر تفاضل مرتبه اول است که در شناسایی تغییرات حالت گذرا و سریع سیگنال کاربرد دارد. اگر x[k] یک سیگنال نمونه‌برداری شده باشد، معیار FODA برای آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y[k] = \frac{1}{M}\sum_{i=0}^{M-1}\frac{x[k-i]-x[k-i-1]}{T_s} \quad (۲۸)$$

که T_s نرخ نمونه‌برداری و M تعداد نمونه‌ها در پنجره متوسط گیری شده است. با محاسبه معیارFODA برای هر یک از مؤلفه‌های ولتاژ یا جریان در ثانویه ترانسفورماتورها روی ترمینال A یا B، و مقایسه آن با مقدار آستانه از پیش تعیین شده، می‌توان بروز خطا را تشخیص داد. به عنوان مثال فرض کنید $U_{A2(t)}$ سیگنال ولتاژ اندازه‌گیری شده و $U_{A2}[n]$ فرم گسسته متناظرش باشد. معیار FODA برای این سیگنال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FODA\left(U_{A2}[n]\right) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\frac{U_{A2}[n-i]-U_{A2}[n-i-1]}{T} \quad (۲۹)$$

مقدار آستانه نیز به روش آماری تحت شرایط نرمال (بدون خطا) محاسبه می‌شود. برای این منظور، مقدار متوسط و انحراف استاندارد معیار FODA روی یک پنجره زمانی تحت شرایط نرمال محاسبه شده و مقدار آستانه از جمع این دو کمیت به دست می‌آید. به عبارت دیگر اگر $\mu_{\text{pre}} = \text{mean}\,(|FODA|)_{\text{pre}}$ و $\sigma_{\text{pre}} = \text{std}(|FODA|)_{\text{pre}}$ به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد $FODA$ باشند، مقدار آستانه برابر خواهد بود:

$$FODA_{thr} = \mu_{pre} + \alpha\sigma_{pre} \quad (۳۰)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

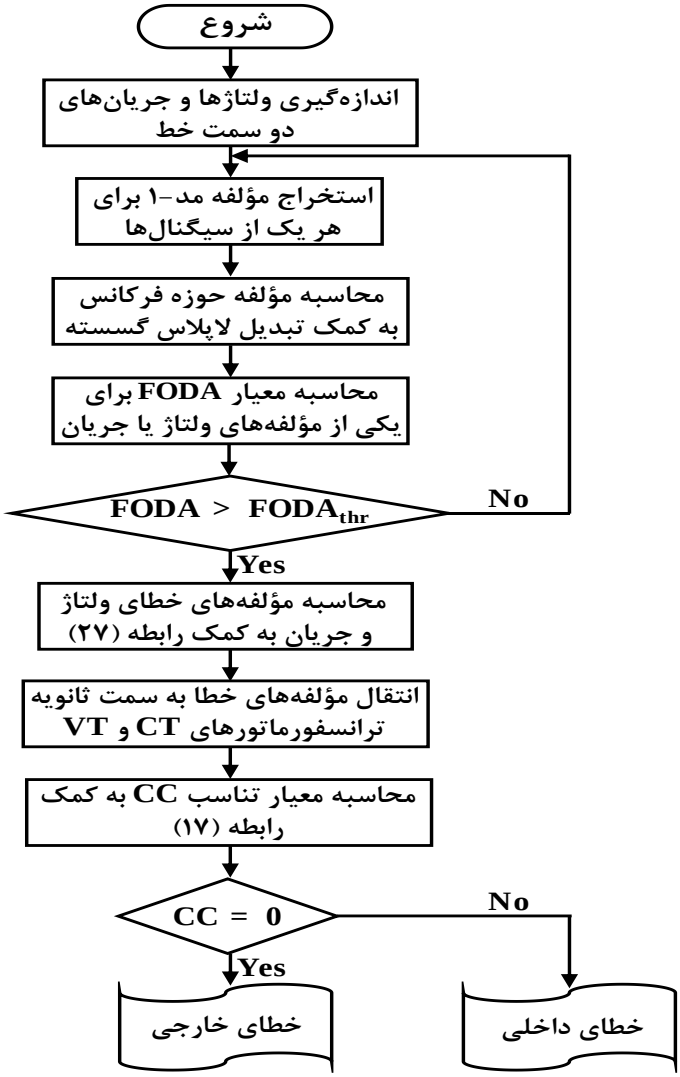
در این رابطه، α ضریب وزنی است که برای مدل‌سازی اثر پراکندگی سیگنال استفاده می‌شود و مقداری بین ۵ تا ۱۵ دارد. در صورتی که معیار FODA از مقدار آستانه $FODA_{thr}$ بیشتر باشد، خطا صورت گرفته و در غیر این صورت، خطایی رخ نداده است.

۲-۳- الگوی تفکیک خطای داخلی و خارجی

همان‌طور که در بخش ۲ بیان شد، معیار تناسب CC به‌منظور تفکیک خطای داخلی و خارجی استفاده می‌شود. در خطای خارجی، CC≈0 است و در مورد خطای داخلی CC=H≠0 است که H از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H = -\left(\frac{\Delta U_{2F}\left(\Delta I_{2FA} - \Delta I_{2FB}\right) + \Delta U_{2A}\left(\Delta I_{2B}\cosh\left(\gamma l\right) - \Delta I_{2FA}\cosh\left(\gamma x\right)\right) + \Delta U_{2B}\left(\Delta I_{2FB}\cosh\left(\gamma\left(l-x\right)\right) - \Delta I_{2A}\cosh\left(\gamma l\right)\right)}{\left(\Delta U_{2A}\Delta I_{2A} - \Delta U_{2B}\Delta I_{2B}\right)\left(1+\cosh\left(\gamma l\right)\right)} \right) \quad (۳۱)$$

در نهایت فلوچارت الگوی حفاظت پیشنهادی به صورت شکل (۷) قابل ترسیم است.



شکل (۷): فلوچارت الگوی حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی

Figure (7): Flowchart of the proposed differential protection pattern

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۴- نتایج عددی

در این بخش، یک خط انتقال بلند مجهز به CT و VT در دو سر خط با مشخصات جدول (۱) در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده و الگوی حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی روی آن پیاده‌سازی می‌گردد. مدل شبیه‌سازی شده در محیط *MATLAB/Simulink* پیاده‌سازی گردیده است. در این مدل، سیگنال‌های جریان و ولتاژ در دو انتهای خط انتقال با نرخ نمونه‌برداری مناسب برداشت شده‌اند تا دقت تحلیل گذرای سیستم حفظ شود. درمرحله‌ی نخست، مولفه‌های مد ۱ از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده استخراج شده و به عنوان ورودی فرآیند پردازش سیگنال مورد استفاده قرارگرفته‌اند.

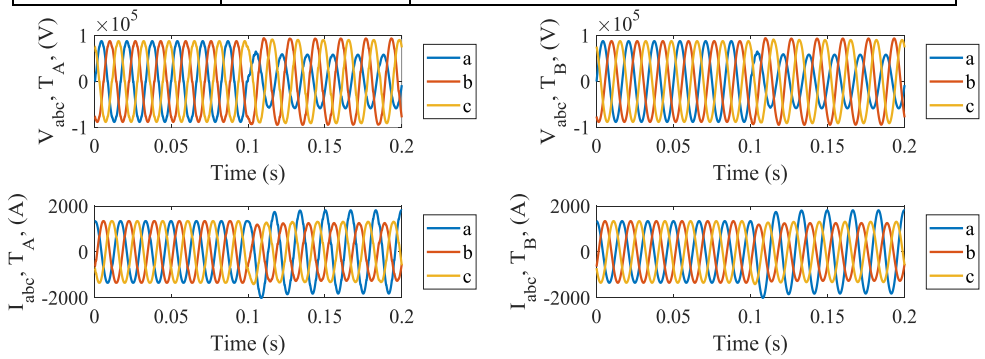
سپس، برای تحلیل فرکانسی و استخراج ویژگی‌های تشخیصی، تبدیل لاپلاس گسسته بر روی سیگنال‌هاا عمال شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تبدیل، معیارپیشنهادی*FODA* به صورت یک سیگنال محاسبه گردیده و مقدار آستانه‌ی متناظر آن به صورت عددی تعیین شده است. مقایسه‌ی سیگنال معیار*FODA* با مقدار آستانه، امکان تشخیص سریع وقوع خطا را فراهم می‌سازد. در گام بعد، به‌منظور تفکیک خطاهای داخلی و خارجی، مولفه‌های جریان و ولتاژ مربوطبه حالت خطا استخراج شده و معیار تناسب پیشنهادی*CC* محاسبه می‌شود. با مقایسه‌ی مقدار معیار*CC* با صفر، نوع خطا (داخلی یا خارجی) به‌طور دقیق مشخص می‌گردد.

سیگنال‌های جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده روی ترمینال‌هایA و B، مؤلفه‌های مد ۱ استخراج شده متناظر با هر کمیت و مؤلفه انتقال یافته به سمت ثانویه CT و VTبرای یک خطای داخلی تکفاز به زمین a-g به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ترسیم شده است.در این سناریو، خطا در لحظه t=0.1s ثانیه با مقاومت خطای ۱۰ اهم و مقاومت زمین ۱ اهم شبیه‌سازی شده است.

Table (1): Simulation parameters

جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	واحد	مقدار
طول خط انتقال، l	km	۲۰۰
نرخ نمونه‌برداری، Ts	s	۱×۴-۱۰
ولتاژ اسمی شبکه‌های ac، V_{rms}	kV	۱۰۰
توان اسمی شبکه‌هایac، S_{nom}	MVA	۱۵۰
فرکانس اسمی شبکه‌هایac، f	Hz	۶۰
مقاومت خط انتقال، R	Ω/km	۰,۰۱۲۷۳
اندوکتانس خط انتقال، L	H/km	۰,۹۳۳۷×۱۰$^{-۳}$
ظرفیت خازنی خط انتقال،C	F/km	۱۲,۷۴×۱۰$^{-۹}$
اندازه ثابت انتشار خط، γ	Neper/km	۲,۳۵۰۷۶×۱۰$^{-۵}$

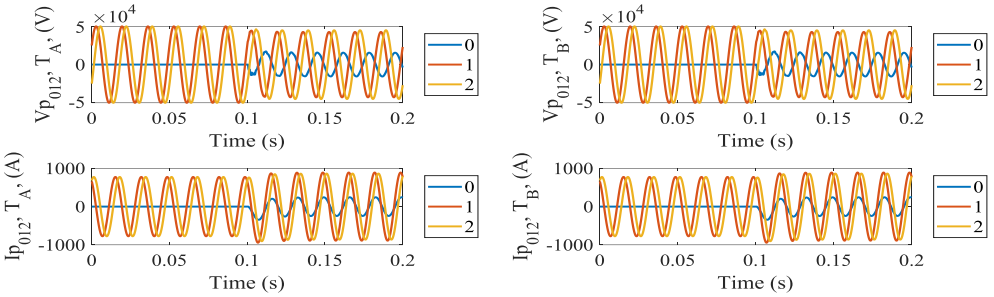


شکل (۸): ولتاژ و جریان سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال‌هایA وB تحت خطای داخلی *a-g*

Figure (8): Three-phase voltage and current measured on terminals A and B under internal fault a-g

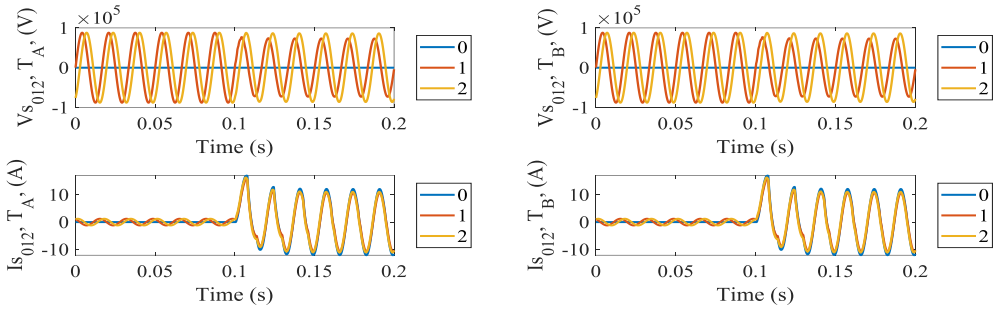
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۹): ولتاژ و جریان مدل محاسبه‌شده برای سمت اولیه ترانسفورماتورهای VT و CT روی ترمینال‌هایA و B تحت خطای داخلی*a-g*

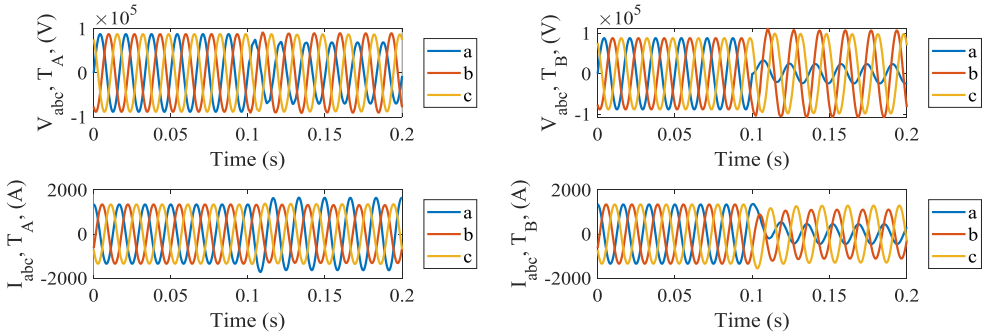
Figure (9): Calculated model voltage and current for the primary side of VT and CT transformers on terminals A and B under internal fault a-g



شکل (۱۰): ولتاژ و جریان مدل محاسبه شده برای سمت ثانویه ترانسفورماتورهای VT و CT روی ترمینال‌هایA و B تحت خطای داخلی *a-g*

Figure (10): Calculated model voltage and current for the secondary side of VT and CT transformers on terminals A and B under internal fault a-g

علاوه بر این، شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، خروجی‌های متناظر با یک سناریوی خطای خارجی با مشخصه‌های مشابه را روی شبکه متصل به ترمینال B نشان می‌دهند.

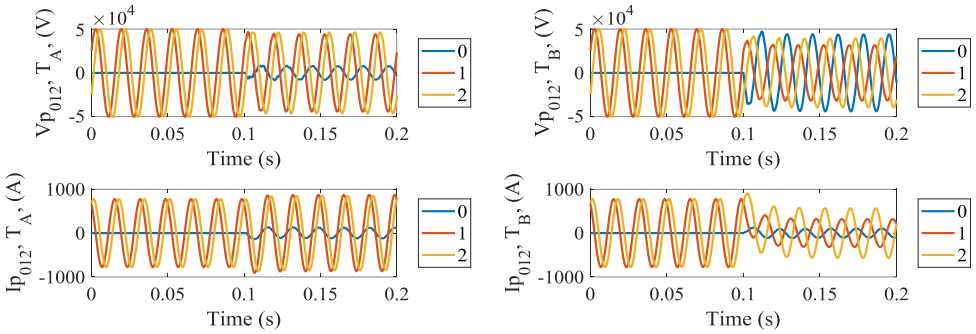


شکل (۱۱): ولتاژ و جریان سه‌فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال‌های A وB تحت خطای خارجی*a-g*

Figure (11): Three-phase voltage and current measured on terminals A and B under external fault a-g

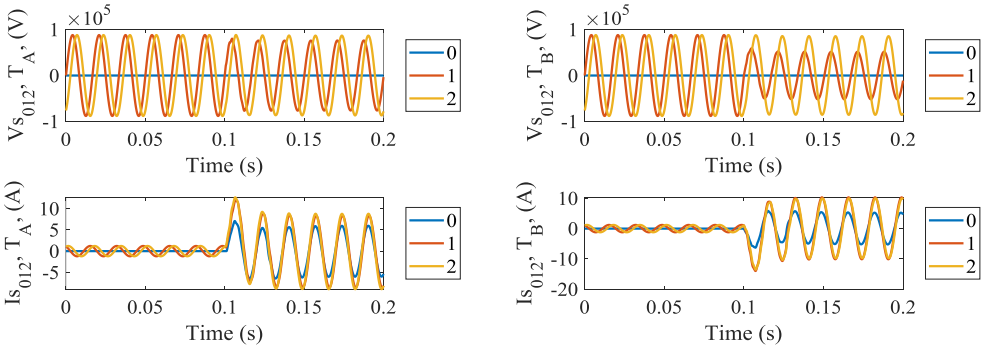
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۱۲): ولتاژ و جریان مدل محاسبه شده برای سمت اولیه ترانسفورماتورهای VT و CT روی ترمینال‌های A و B تحت خطای خارجی *a-g*

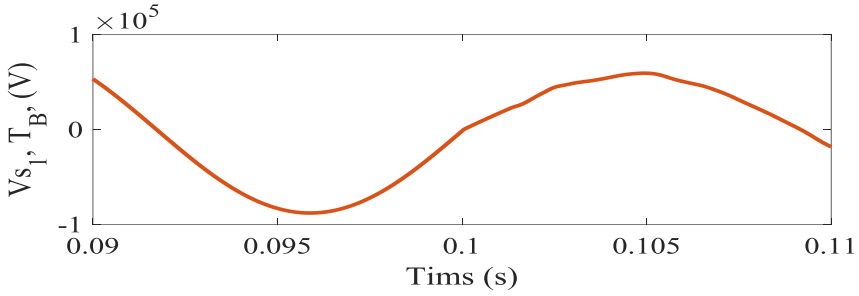
Figure (12): Calculated model voltage and current for the primary side of VT and CT transformers on terminals A and B under external fault a-g



شکل (۱۳): ولتاژ و جریان مدل محاسبه شده برای سمت ثانویه ترانسفورماتورهای VT و CT روی ترمینال‌های A و B تحت خطای خارجی *a-g*

Figure (13): Calculated model voltage and current for the secondary side of VT and CT transformers on terminals A and B under external fault a-g

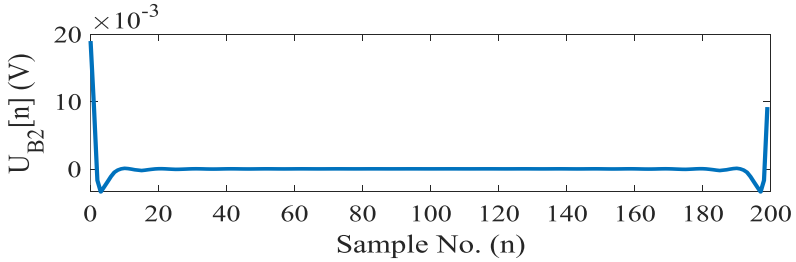
شکل‌های ۱۰ و ۱۳ نشان می‌دهند که تحت شرایط خطای داخلی و خارجی، همه مؤلفه‌های ولتاژ و جریان سمت ثانویه ترانسفورماتورهای VT و CT روی هر دو ترمینال شبکه نسبت به حالت نرمال (بدون خطا) انحراف دارند. بنابراین به‌منظور تشخیص خطا می‌توان از هر یک از این مؤلفه‌ها استفاده نموده و معیار FODA متناظرش را محاسبه نمود. به این منظور در این بخش از مؤلفه مد ۱ ولتاژ ثانویه VT نصب شده روی ترمینال B استفاده می‌کنیم ابتدا یک پنجره زمانی به طول ۰،۰۲ ثانیه (T=0.02s) مطابق با شکل (۱۴) انتخاب نموده و نمونه‌های آن را به تبدیل لاپلاس گسسته اعمال می‌کنیم. به این ترتیب ۲۰۰ نمونه (N=200) در پنجره زمانی انتخابی مورد آنالیز قرار گرفته و تشخیص و دسته‌بندی خطای داخلی و خارجی به کمک آن انجام می‌گیرد. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب سیگنال حوزه لاپلاس گسسته و معیار FODA متناظرش را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): پنجره زمانی انتخاب شده به طول ۰،۰۲ ثانیه

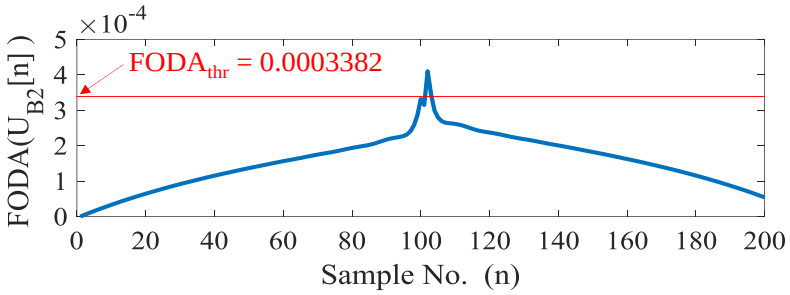
Figure (14): Selected time window of 0.02 seconds

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۱۵): تبدیل لاپلاس گسسته متناظر با سیگنال شکل ۱۴

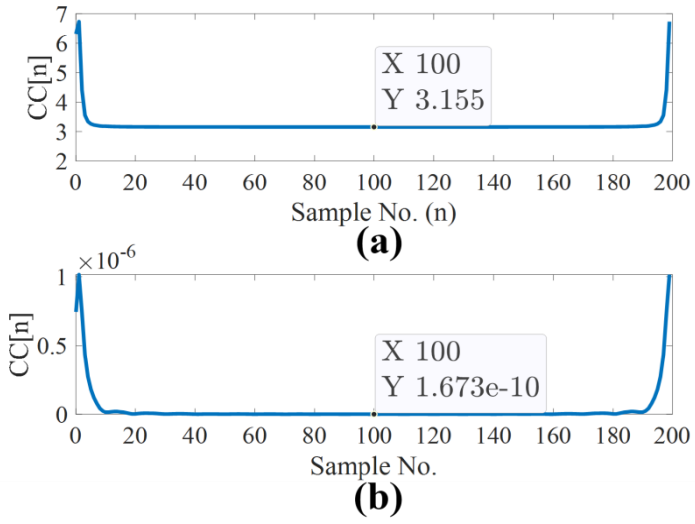
Figure (15): Discrete Laplace transform corresponding to the signal in Figure 14



شکل (۱۶): معیار FODA و مقدار آستانه محاسبه شده پیش از خطا

Figure (16): FODA criterion and threshold value calculated pre-fault

در شکل (۱۶)، برای یک پنجره زمانی به طول برابر پیش از بروز خطا (یعنی شرایط نرمال)، مقدار آستانه FODAthr محاسبه شده است. در صورتی که برای یک نمونه خاص (که همان نمونه متناظر با لحظه بروز خطا است) اندازه FODA از مقدار آستانه‌اش بیشتر شود، بروز خطا تشخیص داده می‌شود. پس از تشخیص خطا، تفکیک خطای داخلی یا خارجی بر اساس مؤلفه‌های ولتاژ و جریان خطای ثانویه و محاسبه معیار CC صورت می‌گیرد. مؤلفهCC برای دو سناریوی خطای داخلی و خارجی به مشخصه‌های یکسان در شکل (۱۷) ترسیم شده است. واضح است که در سناریوی خطای داخلی، مؤلفهCC صفر نیست در حالی که در سناریوی خطای خارجی، این مؤلفه مقدار بسیار کوچکی است که تقریباً صفر در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱۷): معیار تناسب CC برای دو سناریوی خطا با مشخصه‌های یکسان، (*a*) خطای داخلی، (*b*) خطای خارجی

Figure (17): CC fitness criterion for two fault scenarios with identical characteristics, (a) internal fault, (b) external fault

۱-۴- آنالیز حساسیت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

به‌منظور اعتبارسنجی الگوی حفاظت پیشنهادی، عملکرد این الگو تحت سناریوهای مختلف ارزیابی می‌گردد. آنالیزهای حساسیت تحت شرایط انواع خطای سه فاز و تکفاز، مقاومت‌های خطای متغیر، زوایای شروع مختلف، شرایط نویزی مختلف انجام شده و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج این جدول، عملکرد دقیق الگوی حفاظت پیشنهادی را تحت شرایط مختلف خطا نشان می‌دهد. در تمامی سناریوهای شبیه‌سازی شده، تشخیص خطا و تفکیک خطای داخلی و خارجی به درستی انجام شده است. بنابراین الگوی پیشنهادی نسبت به نوع خطا، مقاومت خطا، زاویه شروع خطا و شرایط نویز اندازه‌گیری مقاوم است.

Table (2): Sensitivity analysis results

جدول (۲): نتایج آنالیز حساسیت

خطا	نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	زاویه شروع خطا(°)	SNR (dB)	FODA در نمونه متناظر با زمان خطا	$FODA_{thr}$	CC در نمونه متناظر با زمان خطا
داخلی	a-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۹۵	۰,۰۰۰۶۵	۳,۲۰
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۴۰	۰,۰۰۰۳۳	۳,۱۵
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۲۸	۰,۰۰۰۱۸	۲,۹۰
	b-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۱۰	۰,۰۰۰۸۰	۳,۴۵
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۶۲	۰,۰۰۰۴۵	۳,۳۰
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۴۰	۰,۰۰۰۲۵	۳,۰۵
	c-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۱۲	۰,۰۰۰۷۰	۳,۳۵
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۵۸	۰,۰۰۰۴۲	۳,۲۲
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۳۶	۰,۰۰۰۲۴	۳,۰۰
	ab-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۸۰	۰,۰۰۱۲۰	۴,۱۰
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۱۰۵	۰,۰۰۰۷۸	۳,۸۵
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۷۲	۰,۰۰۰۵۰	۳,۶۰
	ac-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۶۵	۰,۰۰۱۱۰	۴,۰۰
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۹۸	۰,۰۰۰۷۲	۳,۸۰
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۶۸	۰,۰۰۰۴۸	۳,۵۵
	bc-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۷۲	۰,۰۰۱۱۵	۴,۰۵
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۱۰۴	۰,۰۰۰۷۴	۳,۸۲
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۷۳	۰,۰۰۰۴۹	۳,۵۸
	ab	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۴۰	۰,۰۰۰۹۵	۳,۷۰
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۸۵	۰,۰۰۰۶۰	۳,۴۵
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۳۶	۳,۲۰
	ac	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۳۵	۰,۰۰۰۹۲	۳,۶۸
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۸۲	۰,۰۰۰۵۸	۳,۴۲
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۵۳	۰,۰۰۰۳۵	۳,۱۸
	bc	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۱۳۸	۰,۰۰۰۹۴	۳,۶۹
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۸۴	۰,۰۰۰۵۹	۳,۴۴
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۵۴	۰,۰۰۰۳۶	۳,۱۹
	abc	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۲۲۰	۰,۰۰۱۵۰	۵,۱۰
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۱۲۱	۰,۰۰۰۸۵	۴,۰۰
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۸۷	۰,۰۰۰۵۵	۳,۷۵

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

خطا	نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	زاویه شروع خطا (°)	SNR (dB)	FODA در نمونه متناظر با زمان خطا	$FODA_{thr}$	CC در نمونه متناظر با زمان خطا
خارجی	a-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۵۲	۰,۰۰۰۳۰	$۱,۲۵۹\times۱۰^{-۱۱}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۴۸	۰,۰۰۰۱۱	$۱,۶۷۳\times۱۰^{-۱۰}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۳۵	۰,۰۰۰۱۰	$۹,۶۵۱\times۱۰^{-۱۲}$
	b-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۶۰	۰,۰۰۰۳۲	$۱,۳۸۰\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۵۰	۰,۰۰۰۱۴	$۱,۹۲۵\times۱۰^{-۱۰}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۳۶	۰,۰۰۰۱۱	$۱,۰۲۲\times۱۰^{-۱۰}$
	c-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۳۱	$۱,۳۲۴\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۴۹	۰,۰۰۰۱۲	$۱,۸۹۶\times۱۰^{-۱۱}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۳۴	۰,۰۰۰۱۰	$۹,۵۳۶\times۱۰^{-۱۲}$
	ab-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۸۰	۰,۰۰۰۵۰	$۲,۱۰۴\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۶۰	۰,۰۰۰۱۸	$۲,۵۱۴\times۱۰^{-۱۱۱}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۴۲	۰,۰۰۰۱۳	$۱,۲۹۶\times۱۰^{-۱۰}$
	ac-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۷۸	۰,۰۰۰۴۸	$۲,۰۵۱\times۱۰^{-۱۱}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۵۸	۰,۰۰۰۱۷	$۲,۳۷۷\times۱۰^{-۱۱}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۴۰	۰,۰۰۰۱۲	$۱,۱۱۴\times۱۰^{-۱۰}$
	bc-g	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۷۹	۰,۰۰۰۴۹	$۱,۰۸۶\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰,۰۰۰۵۹	۰,۰۰۰۱۷	$۲,۳۵۵\times۱۰^{-۱۱}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰,۰۰۰۴۱	۰,۰۰۰۱۲	$۱,۱۵۸\times۱۰^{-۱۰}$
	ab	۱۰	۰	۳۰	۰,۰۰۰۷۲	۰,۰۰۰۴۴	$۱,۹۰۸\times۱۰^{-۱۰}$

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰٫۰۰۰۵۶	۰٫۰۰۰۱۶	$۲٫۰۲۲\times۱۰^{-۱۱}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰٫۰۰۰۳۹	۰٫۰۰۰۱۲	$۱٫۳۳۵\times۱۰^{-۱۰}$
	ac	۱۰	۰	۳۰	۰٫۰۰۰۷۰	۰٫۰۰۰۴۳	$۱٫۸۵۰\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰٫۰۰۰۵۵	۰٫۰۰۰۱۵	$۱٫۹۵۷\times۱۰^{-۱۰}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰٫۰۰۰۳۸	۰٫۰۰۰۱۱	$۹٫۸۱۵\times۱۰^{-۱۲}$
	bc	۱۰	۰	۳۰	۰٫۰۰۰۷۱	۰٫۰۰۰۴۴	$۱٫۸۷۱\times۱۰^{-۱۰}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰٫۰۰۰۵۷	۰٫۰۰۰۱۶	$۱٫۲۲۳\times۱۰^{-۱۰}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰٫۰۰۰۳۸	۰٫۰۰۰۱۱	$۹٫۵۵۶\times۱۰^{-۱۲}$
	abc	۱۰	۰	۳۰	۰٫۰۰۱۰۰	۰٫۰۰۰۶۵	$۳٫۰۲۵\times۱۰^{-۱}$
		۱۰۰	۴۵	۵۰	۰٫۰۰۰۶۸	۰٫۰۰۰۲۰	$۱٫۴۴۵\times۱۰^{-۱۰}$
		۵۰۰	۱۲۰	۷۰	۰٫۰۰۰۴۵	۰٫۰۰۰۱۴	$۱٫۳۰۶\times۱۰^{-۱۰}$

۲-۴- مطالعه مقایسه‌ای

به‌منظور تأیید بیشتر الگوی حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی، عملکرد این روش با الگوهای حفاظتی مشابه و جدید ارائه شده در مقالات مقایسه می‌شود. به این منظور، مطالعات صورت گرفته در [۲۵] تا [۲۸] بررسی شده و معیارهای الگوهای حفاظتی در جدول (۳) با هم مقایسه شده است. در [۲۵]، شاخصی تحت عنوان امپدانس انطباقی پایلوت (PSI) به‌منظور تشخیص خطای داخلی و خارجی در خط انتقال معرفی شده است که از تبدیل فازور ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده روی دو انتهای خط به دست می‌آید. یک الگوی گرافیکی مبتنی بر ساختار هندسی شکل لیساژو که از سیگنال‌های جریان دو ترمینال خط انتقال به دست آمده است، به‌منظور تفکیک خطای داخلی و خارجی در [۲۶] ارائه شده است. در [۲۷]، مشخصه‌های جریان کار جزئی (POC) اندازه‌گیری شده روی CTهای دو سمت خط انتقال به‌منظور تفکیک خطای داخلی و خارجی استفاده شده است. یک الگوی مبتنی بر یادگیری ماشین نیز در [۲۸] ارائه شده است که در آن، داده‌های مورد نیاز برای آموزش الگوی حفاظتی، به کمک تبدیل فوریه گسسته از روی سیگنال‌های ولتاژ و جریان استخراج می‌گردد.

Table (3): Comparative study results

جدول (۳): نتایج مطالعه مقایسه‌ای

مرجع	روش پیشنهادی	حوزه پردازش سیگنال خطا	ارزیابی تحت مقاومت خطای متغیر	ارزیابی تحت زاویه شروع خطای متغیر	ارزیابی تحت شرایط نویز متغیر	در نظر گرفتن پاسخ فرکانسی متغیر *CT* و *VT*	بار محاسباتی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[۲۵]	امپدانس انطباقی پایلوت	زمان	✓	×	×	✓	متوسط
[۲۶]	ساختار هندسی شکل لیساژو	زمان	✓	×	✓	×	بالا
[۲۷]	مشخصه‌های جریان کارجزئی	زمان	✓	×	×	×	پایین
[۲۸]	یادگیری ماشین و تبدیل فوریه گسسته	فرکانس	✓	×	×	×	بالا
مطالعه پیش رو	**تبدیل لاپلاس گسسته**	**فرکانس**	✓	✓	✓	✓	**پایین**

جدول (۳)، مزایا و برتری الگوی پیشنهادی را در مقایسه با سایر الگوهای مشابه ارائه شده در ادبیات، برجسته می‌کند. بار محاسباتی پایین و عدم حساسیت الگوی پیشنهادی به پارامترهای خطا و شرایط اندازه‌گیری، مهم‌ترین مزیت‌های این روش است. از سوی دیگر، در مقایسه با الگوهای حفاظتی مبتنی بر یادگیری، نیازی به مجموعه داده اولیه برای آموزش و تست وجود ندارد و از این رو، بار محاسباتی و زمان پاسخگویی الگوی حفاظتی کاهش قابل‌توجهی می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوی حفاظت دیفرانسیل در حوزه فرکانس مبتنی بر تبدیل لاپلاس گسسته و تبدیل مدال ارائه شد که اثرات پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان را به‌طور صریح در فرآیند تشخیص و تفکیک خطا لحاظ می‌کند. نتایج تحلیل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری به شرح زیر هستند:

- دقت بالا در تشخیص خطا: معیار تناسب پیشنهادی (CC) توانست به‌طور مؤثر خطاهای داخلی و خارجی را از یکدیگر متمایز کند، به‌گونه‌ای که مقدار آن در خطاهای خارجی به‌طور تقریبی صفر و در خطاهای داخلی غیر صفر است.
- مقاومت در برابر تغییر مشخصه‌های تجهیزات اندازه‌گیری: برخلاف روش‌های متداول که به شدت تحت تأثیر پاسخ فرکانسی VTو CT قرار می‌گیرند، در الگوی پیشنهادی اثر این تجهیزات با در نظر گرفتن توابع انتقال جبران شده و بدین ترتیب پایداری و قابلیت اعتماد الگوریتم افزایش یافته است.
- کارایی محاسباتی بالا: استفاده از تبدیل لاپلاس گسسته، بار محاسباتی و نرخ نمونه‌برداری موردنیاز را نسبت به روش‌های مبتنی بر موجک و هیلبرت به طور قابل‌توجهی کاهش داده و امکان استفاده برخط از این روش را فراهم ساخته است.
- عدم وابستگی به شرایط کاری شبکه: الگوریتم پیشنهادی مستقل از سطح توان انتقالی، طول خط، مشخصه‌های امپدانسی، و حتی پهنای باند فرکانسی سیستم بوده و عملکرد پایدار آن در مواجهه با خطاهای با امپدانس بالا نیز اثبات گردید.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که الگوی حفاظتی پیشنهادی می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی در حفاظت دیفرانسیلی خطوط انتقال بلند مورد استفاده قرار گیرد. این روش ضمن ارائه‌ی دقت و سرعت بالا در آشکارسازی خطا، از نظر بار محاسباتی و نیازهای عملیاتی نیز بهینه است و قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های حفاظتی دیجیتال پیشرفته را دارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

References
مراجع

[1] K. A. Kharusi, A. E. Haffar, and M. Mesbah, "Adaptive Machine-Learning-Based transmission line fault detection and classification connected to Inverter-Based generators,"*Energies*, vol. 16, no. 15, p. 5775, 2023. doi: 10.3390/en16155775.

[2] J. C. H. Paye, et al., "High Impedance Fault Models for Overhead Distribution Networks: A Review and Comparison with MV Lab Experiments,"*Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1125, 2024. doi: 10.3390/en17051125.

[3] S. R. Fahim, Y. Sarker, S. K. Sarker, Md. R. I. Sheikh, and S. K. Das, "Self attention convolutional neural network with time series imaging based feature extraction for transmission line fault detection and classification,"*Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106437, 2020. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106437.

[4] I. Mousaviyan, S. G. Seifossadat, and M. Saniei, "Traveling wave-based algorithm for fault detection, classification, and location in STATCOM-Compensated parallel transmission lines,"*Electric Power Systems Research*, vol. 210, p. 108118, 2022. doi: 10.1016/j.epsr.2022.108118.

[5] P. Mundra, A. Arya, S. K. Gawre, S. Biswal, F. V. Lopes, and O. P. Malik, "Taylor series based protection starting element for STATCOM compensated transmission line,"*Electric Power Systems Research*, vol. 204, p. 107700, 2022. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107700.

[6] S. Belagoune, N. Bali, A. Bakdi, B. Baadji, and K. Atif, "Deep learning through LSTM classification and regression for transmission line fault detection, diagnosis and location in large-scale multi-machine power systems,"*Measurement*, vol. 177, p. 109330, 2021. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109330.

[7] T. N. Hu, Y. F. Zeng, K. Peng, H. Hu, H. M. Wang, and K. F. Liu, "Improvement of transmission-line-based fault locating for typical traveling-wave accelerator with constant-gradient structures,"*Nuclear Engineering and Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 2011-2018, 2024. doi: 10.1016/j.net.2024.01.008.

[8] S. R. Ola, A. Saraswat, S. K. Goyal, S. K. Jhajharia, B. Rathore, and O. P. Mahela, "Wigner distribution function and alienation coefficient-based transmission line protection scheme,"*IETGeneration, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 10, pp. 1842–1853, 2020. doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1414.

[9] B. Chatterjee and S. Debnath, "Cross correlation aided fuzzy based relaying scheme for fault classification in transmission lines,"*Engineering* Science *and Technology, an International Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 534–543, 2020. doi: 10.1016/j.jestch.2019.07.002.

[10] P. Stefanidou-Voziki, N. Sapountzoglou, B. Raison, and J. L. Dominguez-Garcia, "A review of

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

fault location and classification methods in distribution grids,"*Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 108031, 2022. doi: 10.1016/j.epsr.2022.108031.

[11] G. T. De Alencar, R. C. D. Santos, and A. Neves, "A fault recognition method for transmission systems based on independent component analysis and convolutional neural networks,"*Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110105, 2024. doi: 10.1016/j.epsr.2023.110105.

[12] A. Mukherjee, P. K. Kundu, and A. Das, "Application of Principal Component Analysis for Fault Classification in Transmission Line with Ratio-Based Method and Probabilistic Neural Network: A Comparative Analysis,"*Journal of the Institution of Engineers(India) Series B*, vol. 101, no. 4, pp. 321–333, 2020. doi: 10.1007/s40031-020-00466-5.

[13] G. Kapoor, V. Soni, and J. Yadvendra, "FAST Walsh–Hadamard Transform-Based Artificial Intelligent Technique for transmission line fault detection and faulty phase recognition,"*Algorithms for intelligent systems*, 2020, pp. 141–149. doi: 10.1007/978-981-15-1059-5_17.

[14] K. O. M. Touati, M. Boudiaf, L. Mazouz, and L. Cherroun, "Efficient hybrid strategy based on FFT and fuzzy logic techniques applied to fault diagnosis in power transmission line,"*SoftComputing*, 2023. doi: 10.1007/s00500-023-09089-6.

[15] X. Guo, C. Tao, T. Li, Q. Zhuo, and X. Bai, "Fault location of multi-point hybrid transmission line based on HHT,"*Journal ofApplied Science and Engineering*, vol. 26, no. 12, pp. 1731-1738, 2023. doi: 10.6180/jase.202312_26(12).0005.

[16] R. Arranz, Á. Paredes, A. Rodríguez, and F. Muñoz, "Fault location in Transmission System based on Transient Recovery Voltage using Stockwell transform and Artificial Neural Networks,"*Electric Power Systems Research*, vol. 201, p. 107569, 2021. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107569.

[17] U. B. De Souza, J. P. L. Escola, and L. Da Cunha Brito, "A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions,"*Digital Signal* Processing, vol. 120, p. 103292, 2022. doi: 10.1016/j.dsp.2021.10329.

[18] B. Sundararaman and P. Jain, "Fault Detection and Classification in Electrical Power Transmission System Using Wavelet Transform,"*Engineering Proceedings*, vol. 59, no. 1, p. 71, 2023. doi: 10.3390/engproc2023059071.

[19] Z. Li, "Gabor wavelet transform combined with area CNN in appearance intelligent detection of stayed cables,"*Journal of Vibroengineering*, vol. 25, no. 8, pp. 1465–1479, 2023. doi: 10.21595/jve.2023.23231.

[20] A. K. Samantaray and A. D. Rahulkar, "New design of adaptive Gabor wavelet filter bank for medical image retrieval,"*IETImageProcessing*, vol. 14, no. 4, pp. 679–687, 2020. doi: 10.1049/iet-ipr.2019.1024.

[21] J. Le, H. Zhang, C. Gao, and Q. Zhou, "Harmonic voltage measurement error of the capacitor

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

voltage transformer," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 11, p. e0205231, Nov. 2018, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205231.

[22] Dragana Naumovic-Vukovic and Slobodan Skundric, "Contribution to the calibration of current transformers with a rated secondary current of less than 1A," *Measurement Sensors*, pp. 101428–101428, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101428.

[23] L. Jing, T. Zhao, L. Xia, and J. Zhou, "Alternating current microgrid protection method utilizing photovoltaic low-voltage ride-through characteristics," *Electrical Engineering*, vol. 105, no. 5, pp. 2949–2960, May 2023, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-023-01836-0.

[24] H. Shu, X. Jiang, X. Wang, P. Cao, and B. Yang, "Identification between internal and external faults of UHVDC transmission lines based on sequential overlapping derivative transform of voltage transient," *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 21, pp. 4643–4653, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0395.

[25] M. Khoshbouy, A. Yazdaninejadi, and T. G. Bolandi, "Transmission line adaptive protection scheme: A new fault detection approach based on pilot superimposed impedance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107826, May 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107826.

[26] B. Patel, P. Bera, and S. H. Nee Dey, "A Novel Method to Distinguish Internal and External Faults during Power Swing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–1, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrd.2020.3023026.

[27] M. Hossain, I. Leevongwat, and P. Rastgoufard, "Partial operating current characteristics to discriminate internal and external faults of differential protection zones during CT saturation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 2, pp. 379–387, Oct. 2017, doi: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0283.

[28] R. Singh and E. Koley, "Linear Discriminant Analysis based Scheme for Fault Detection and Classification of Internal and External Faults in Hybrid Transmission Line," pp. 1–5, Jan. 2025, doi: https://doi.org/10.1109/icpc2t63847.2025.10958712.

[29] E. Akbari, " Fault Detection, Classification and Location in Compensated Transmission System Using Gabor Wavelet Transform and Traveling Wave Theory ", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 1-17, Summer 2024 (in Persian).

[30] E. Akbari, " Design of damping controller for STATCOM connected to doubly fed induction generator in multi-machine power System ", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 41-50, Winter 2023 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

زیرنویس‌ها:

[1] Convolutional Neural Network
[2] Discrete Wavelet Transform
[3] Traveling Waves
[4] static synchronous compensator
[5] Deep learning based on recurrent neural networks
[6] Independent components analysis
[7] Principal component analysis
[8] Walsh-Hadamard transform
[9] Fast Fourier Transform
[10] Hilbert-Huang transform
[11] Stockwell transformation
[12] Wavelet transform
[13] Gabor wavelet
[14] Voltage transformers
[15] Current transformers
[16] Circuit Breaker
[17] Congruence criteria
[18] First-order differential average

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.542.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025