



Semnan University



Research Article

A New Fault Detection and Classification Scheme in MTDC Grids with Hybrid Cable and Overhead Transmission Line

Zahra Moravej ^{a,*}, Amir Imani ^b, Mohammad Pazoki ^c

^a Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^b PhD Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^c Associate Professor, School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 02 August 2023

Revised: 03 September 2023

Accepted: 07 October 2023

Keywords:

HVDC line,
Fault detection,
Fault classification,
ITD,
Non-homogenous line.

ABSTRACT

The growth of exploitation of distributed generation sources (DGs) such as offshore wind farms makes DC networks an interesting alternative to conventional AC grids. But protection of DC lines is one of the main challenges of these grids especially in hybrid non-homogenous corridors including underground cables and overhead lines. In this paper, a new single-end time domain-based protection scheme for fault detection and classification is presented with remarkable features such as easy implementation, low computation burden, low sampling frequency, no setting parameters requirement, and also appropriate performance in noisy conditions. To validate the proper performance of the proposed scheme, several scenarios are simulated including internal and external DC and AC faults, and severe load variations in EMTDC/PSCAD software environment. Also, some hybrid line scenarios such as line length variation, OHL or Cable length changes, and increasing the number of line segments are investigated. The result shows desirable performance in various conditions.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.31417.2509>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: zmoravej@semnan.ac.ir

How to cite this article:

Moravej, Z., Imani, A., & Pazoki, M. (2024). A new fault detection and classification scheme in MTDC grids with hybrid cable and overhead transmission line. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(76), 141-154. doi: 10.22075/jme.2023.31417.2509

روشی نوین در شناسایی و طبقه بندی خطای شبکه‌های MTDC با خطوط انتقال ترکیبی کابل و شبکه هوایی

زهرا مروج^{۱*}، امیر ایمانی^۲، محمد پازکی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵	در سالیان اخیر استفاده از خطوط DC جهت اتصال منابع تولید پراکنده از قبیل مزارع بادی فراساحلی با رشد روزافزونی روبه‌روست. یکی از چالش‌های حفاظت خطوط DC مربوط به خطوط ترکیبی کابل‌های زیرزمینی و خطوط هوایی می‌باشد. در این مقاله، روشی نوین جهت شناسایی و طبقه‌بندی خطای MTDC ترکیبی به کمک ابزارهای پردازش سیگنال در حوزه زمان و با استفاده از داده‌های یک پایانه ارائه شده که دارای مزایایی از قبیل سادگی پیاده‌سازی، سرعت بالای شناسایی، فرکانس پایین نمونه‌برداری و مقاومت مناسب در برابر نویز می‌باشد. به‌وسیله انجام شبیه‌سازی‌های متعدد در محیط نرم‌افزاری PSCAD و پیاده‌سازی الگوریتم حفاظتی در محیط نرم‌افزاری MATLAB، تاثیر پارامترهای خطا همچون مقاومت، نوع و محل وقوع خطا بر عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی مورد صحت سنجی قرار گرفته است. همچنین کارآمدی روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف بهره‌برداری از خطوط ترکیبی همچون تغییر طول خط انتقال، تغییر درصد خطوط کابلی و هوایی و افزایش تعداد بخش‌های خطوط مورد بررسی قرار گرفته و نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول آن می‌باشد.

واژگان کلیدی:

خطوط HVDC،
شناسایی خطا،
طبقه بندی خطا،
روش ITD،
خطوط انتقال ترکیبی.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.31417.2509>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

توسعه روز افزون این تکنولوژی شده‌است [۳]. از طرفی، بهره‌برداری از این سیستم‌ها با چالش‌های متعددی در حوزه کنترل، حفاظت و ... مواجه می‌باشد. موضوع حفاظت این شبکه‌ها در برابر خطاهای اتصال کوتاه خطوط DC همچنان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های این حوزه قلمداد می‌گردد. علت این امر وجود اندوکتانس کم این خطوط در مقایسه با خطوط AC بوده که منجر می‌شود این شبکه‌ها در هنگام وقوع خطا به سرعت دچار کاهش ولتاژ و افزایش بسیار سریع و ناگهانی جریان خطا در چندین میلی‌ثانیه گردند [۴، ۵]. به‌علاوه، در دهه‌های اخیر که بهره‌برداری از شبکه‌های HVDC چندپایانه‌ای^۲ شدت گرفته یکی از اصلی‌ترین

به‌کارگیری سیستم‌های انتقال ولتاژ بالای جریان مستقیم (HVDC) با توجه به رشد روزافزون بار، به‌عنوان جایگزینی مطمئن برای سیستم انتقال جریان متناوب به طرز چشمگیری در حال توسعه می‌باشد که دلیل این امر نیز مزایای بی‌بدیل آن از قبیل تلفات کمتر در مقایسه با شبکه‌های AC سنتی می‌باشد [۱، ۲]. از طرفی توسعه زیرساخت‌های بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر مانند مزارع بادی فراساحلی از یک سو و برتری استفاده از خطوط HVDC به جای خطوط HVAC سنتی جهت اتصال این منابع به شبکه قدرت به دلیل ملاحظات پایداری منجر به

* دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zmoravej@semnan.ac.ir

² Multi-terminal HVDC (MTDC)

۱. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان،

سمنان، ایران

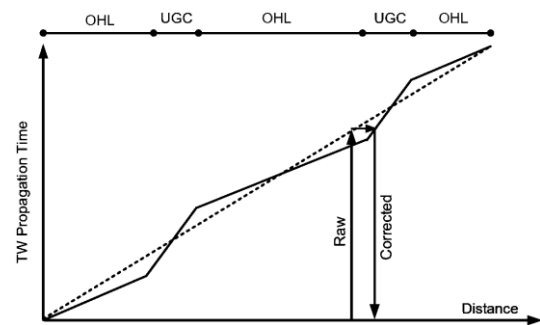
استناد به این مقاله:

در نظر نگرفتن خازن‌های پراکندگی در طول خطوط کابلی اشاره نمود که منجر به کاهش دقت آن می‌گردد. هر چند فرکانس نمونه‌برداری پایین از نقاط قوت این روش می‌باشد. در مرجع [۸، ۱۰] با کمک اندازه‌گیری زمان رسیدن پیشانی امواج سیار منتشر شده هنگام خطا در هر پایانه اقدام به شناسایی و مکان‌یابی خطا در خطوط ترکیبی نموده است. در این طرح حفاظتی از روش تبدیل موجک پیوسته جهت شناسایی پیشانی موج بهره‌گرفته‌است. از اصلی‌ترین نارسایی‌های این روش فرکانس نمونه‌برداری بالا تا ۲ مگاهرتز می‌باشد. در مرجع [۱۱] به کمک تجزیه سیگنال ولتاژ به مدهای هوایی و زمینی و با فرآیندی مشابه مراجع پیشین مکانیابی خطا در یک خط ترکیبی را انجام داده‌است. در مرجع [۱۲، ۱۳] یک روش مکان‌یابی خطای خطوط ترکیبی با استفاده از اندازه‌گیری اختلاف مقدار موج رفت و برگشت با بیان روابط ریاضی حاکم بر امواج سیار و حل معادلات به کمک الگوریتم PSO، ارائه شده‌است. در مرجع [۱۴] با بیان یک مدل ریاضی مبتنی بر گراف برای شبکه، و به کمک تئوری امواج سیار شناسایی خطا در یک خط ترکیبی را ارائه نموده است.

از روش حفاظت دیفرانسیل نیز در شناسایی و مکانیابی خطای خطوط ترکیبی در مراجع [۱۵، ۱۶] استفاده شده است. در مرجع [۱۵] به کمک اندازه‌گیری جریان و ولتاژ در نقاط اتصال خط هوایی و کابل زیردریایی به وسیله حسگرهای نوری شناسایی و مکان‌یابی خطا انجام پذیرفته است. هر چند امکان پیاده‌سازی این روش با توجه به نیاز به حسگرهای متعدد و ارسال همزمان سیگنال‌ها جهت شناسایی در حداقل زمان با چالش‌هایی روبه‌رو می‌باشد.

در مرجع [۱۷] با استفاده از ماشین بردار پشتیبان^۴ و داده‌های آموزش حاصل از محاسبه انرژی سیگنال تجزیه شده جریان و ولتاژ در یک پایانه با تبدیل موجک گسسته شناسایی و مکانیابی خطا انجام پذیرفته است. در این مقاله شناسایی و طبقه‌بندی خطا در خطوط HVDC ترکیبی به کمک تجزیه و تحلیل سیگنال با روش حوزه زمان ITD^۴ ارائه شده و عملکرد آن در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته که نشان از عملکرد مناسب این روش می‌دهد. لازم به ذکر است در مرجع [۱۸] از برای اولین بار از روش ITD جهت شناسایی خطا در یک خط

چالش‌های حفاظتی در این شبکه‌ها، پیرامون استفاده از خطوط ترکیبی کابل زیرزمینی یا زیر دریایی و خطوط هوایی می‌باشد. این خطوط عموماً در اتصال مزاع بادی فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چرا که در برخی از موارد به دلایل مختلف، محل قرارگیری مبدل‌ها با ساحل فاصله داشته که مستلزم استفاده از شبکه هوایی می‌باشد [۶]. در حال حاضر خطوط ترکیبی محدودی همچون Basslink در استرالیا یا Anan-Kihoku در ژاپن مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [۷]. از اصلی‌ترین عوامل این چالش‌ها که در شکل (۱) نیز نشان داده شده می‌توان به تغییر امپدانس مشخصه خطوط در محل اتصال بین کابل و خطوط هوایی اشاره نمود که منتج به شکست امواج سیار و برگشت می‌گردد، چرا که خطوط هوایی دارای امپدانس مشخصه و سرعت امواج سیار بالاتری بوده و در نتیجه درصد زیادی از موج سیار منتشر شده در هنگام ورود به کابل تضعیف شده و به سمت خط هوایی برمی‌گردد [۸].



شکل ۱- مقایسه سرعت امواج سیار منتشر شده در خطوط کابلی و هوایی

مطالعات محدودی در زمینه حفاظت خطوط ترکیبی انجام پذیرفته که اکثر آن‌ها بر مکان‌یابی خطا متمرکز شده‌اند. از اصلی‌ترین روش‌های این حوزه می‌توان به روش‌های امپدانس، هوش مصنوعی، امواج سیار و پردازش سیگنال اشاره نمود.

در مرجع [۹] با استفاده از مدل‌سازی انواع خطا و بررسی تفاوت رفتار دینامیکی آن‌ها شناسایی بخش خطادار کابلی یا هوایی را انجام می‌دهد. در مرجع [۷] با کمک نوشتن روابط KVL در حلقه‌ی خطا و با کمک اندازه‌گیری ولتاژ طرفین راکتور هموارسازی به ارائه روشی جهت شناسایی و طبقه‌بندی خطا مبادرت ورزیده‌است. از نارسایی‌های این روش می‌توان به استفاده از مدل خط غیردقیق RL و

^۴ Intrinsic time decomposition

^۳ Support vector machine

به کمک انواع موج‌های مادر مانند Haar و ... تجزیه انجام می‌پذیرد. همچنین، در این روش برخلاف روش تجزیه به مدهای ذاتی (EMD) در HHT، که فرآیند تجزیه به کمک الگ سازی^۶ (اتصال نقاط اکسترمم بالا و پایین منحنی)، وجود نداشته که منجر به کاهش حجم محاسبات می‌گردد [۲۰، ۲۱].

فرآیند تجزیه سیگنال وابسته به زمان به روش ITD مطابق ذیل می‌باشد.

یک سیگنال وابسته به زمان همچون X_t مفروض است. طبق تعریف این سیگنال را می‌توان به دو بخش شامل مولفه خط مینا^۷ L_t و مولفه چرخش متعارف (PRC) با نوشتار H_t تجزیه نمود [۱۹]. در نتیجه با توجه به رابطه (۱) عملگر ζ قابلیت استخراج مولفه خط مینا را از سیگنال اصلی ورودی دارد.

$$X_t = \zeta X_t + (1 - \zeta) X_t = L_t + H_t \quad (1)$$

همچنین طبق تعریف نقاط $\{\tau_k, k = 1, 2, \dots\}$ نقاطی در محور زمان بوده که در آن اکسترمم محلی اتفاق افتاده است. در نتیجه مقدار سیگنال ورودی در زمان τ_k برابر است با $X_t(\tau_k)$ و در نتیجه مقدار مولفه خط مینا نیز برابر است با $L_t(\tau_k)$. همچنین، مفروض است که L_t و H_t در بازه $[0, \tau_{k+2}]$ و سیگنال X_t در بازه $[0, \tau_{k+2}]$ تعریف گردد. با توجه به موارد فوق، مولفه خط مینای سیگنال که به صورت جزیه خطی شده و از نقاط اکسترمم در بازه $[\tau_k, \tau_{k+1}]$ می‌باشد، به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\zeta X_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) \times (X_t - X_k), t \in (\tau_k, \tau_{k+1}) \quad (2)$$

که در در رابطه فوق L_{k+1} برابر است با:

$$L_{k+1} = \alpha [X_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_{k+1}} \right) (X_{k+2} - X_k)] + (1 - \alpha) X_{k+1} \quad (3)$$

در این رابطه α برابر با ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به رابطه (۴) می‌توان PRC را از تفریق سیگنال L_t از X_t محاسبه نمود. همچنین با تکرار مراحل فوق تجزیه سطوح بالاتر نیز با p گردش مطابق رابطه (۵) انجام می‌پذیرد [۱۹].

$$H_t = X_t - L_t = (1 - \zeta) X_t = \Re X_t \quad (4)$$

HVDC دوپایانه‌ای کابلی ساده استفاده شده است. اصلی‌ترین نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- ارائه یک طرح حفاظتی مبتنی بر پردازش سیگنال حوزه زمان با بار محاسباتی و فرکانس نمونه برداری پایین جهت شناسایی و طبقه بندی خطا در خطوط HVDC ترکیبی چندپایانه‌ای.
 - برخلاف اغلب روش‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، طرح پیشنهادی تک پایانه‌ای بوده و چالش‌های مخابراتی را ندارد
 - قابلیت شناسایی خطا داخل محدوده از سایر رفتارهای گذرای خارجی از قبیل خطای شدید AC و DC خارجی و تغییرات ناگهانی و شدید بار در مدت زمان کمتر از ۱ میلی‌ثانیه.
 - عملکرد مناسب در خطای امیدانس بالا تا ۲۰۰ اهم و سطوح نویزی نسبتاً شدید SNR=10dB.
 - عملکرد مناسب در سناریوهای حفاظتی متعدد خطوط ترکیبی از قبیل تغییر طول کل خط، نسبت کابل به شبکه هوایی، جابه‌جایی خطوط و افزایش تعداد خطوط نامتجانس.
 - اثر تغییرات مقدار رآکتور هموارساز بر عملکرد طرح حفاظتی در نظر گرفته شده است.
- ساختار مقاله به اینصورت است که در بخش ۲ روش تجزیه سیگنال حوزه زمان ITD تشریح شده و طرح حفاظتی پیشنهادی در بخش ۳ ارائه می‌گردد. نتایج شبیه سازی و تجزیه تحلیل آن در بخش ۴ و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۵ انجام می‌پذیرد.

۲- تجزیه سیگنال به روش ITD

روش ITD که در سال ۲۰۰۶ معرفی شده است، روشی تطبیقی مبتنی بر تجزیه سیگنال ورودی به مجموعه‌ای از سیگنال نوسانی به نام PRC^۵ و یک سیگنال باقی‌مانده می‌باشد [۱۹]. از برتری این روش بر روش‌های پردازش سیگنال سنتی مانند تبدیل‌های فوریه، موجک و هیلبرت می‌توان از قابلیت آن در تجزیه سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا نام برد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز آن به سیگنال پایه جهت تجزیه نام برد در حالی که در تبدیل فوریه با استفاده از موج سینوسی و در تبدیل موجک

⁷ Baseline

⁵ Proper rotation component

⁶ Sifting process

$$E_i = W_i^2 \quad (7)$$

$$FI = \frac{(E_i + E_{(i-1)} + \dots + E_{(i-L+1)})}{L} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{L} \sum_{n=i-L+1}^i E_i$$

۳-۲- طبقه‌بندی خطا

پس از شناسایی وقوع خطای داخل محدوده با توجه به مقادیر آستانه انتخابی، شناسایی خطا با استفاده از محاسبه نسبت انرژی هردو قطب انجام می‌پذیرد. جهت دستیابی به مقادیر مرزی جهت تمایز انواع خطا از یکدیگر، از کم اثرترین خطا (در انتهای خط انتقال تحت حفاظت و با حداکثر مقاومت) استفاده شده‌است. به عنوان نمونه در این مقاله، مشخص گردید که در هنگام وقوع خطای PG در انتهای خط انتقال با مقاومت ۲۰۰ اهم میزان مقدار میانگین انرژی قطب مثبت به منفی در ۵ نمونه، ۱.۵ برابر قطب منفی می‌باشد. لازم به ذکر است، که این شاخص در زمان وقوع خطای PN به دلیل تقارن رفتار گذرای هر دو قطب نزدیک به یک می‌باشد.

لازم به ذکر است که در صورتی که از پیکربندی دیگری همچون ساختارهای HVDC تک قطبی و دو قطبی با هادی برگشت استفاده شود، طبقه بندی خطا به دلیل افزایش انواع خطا بدین روش ممکن نبوده و در نتیجه این طرح در ساختارهای متقارن و با برگشت زمین قابل پیاده سازیست.

۳-۳- انتخاب سطح تجزیه

در تمامی روش‌های شناسایی خطا مبتنی بر استخراج ویژگی به کمک تجزیه سیگنال ورودی، دستیابی به تعداد سطح تجزیه بهینه امری چالش برانگیز می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش بار محاسباتی در صورت افزایش تعداد سطوح تجزیه دانست که امری نامطلوب است. لذا، دستیابی به شاخصی جهت تعیین مقدار بهینه سطوح تجزیه در تحلیل سیگنال خطا می‌تواند در راه گشا باشد. برای این منظور یک شاخص آماری به نام پیچیدگی^{۱۱} مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص که از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود، معیاری جهت مقایسه شباهت یک سیگنال با منحنی توزیع نرمال می‌باشد.

$$X_i = \Re X_i + \zeta X_i = \Re X_i + (\Re + \zeta) X_i \quad (5)$$

$$= (\Re(1 + \zeta) + \zeta^2) X_i$$

$$= (\Re \sum_{k=0}^{p-1} \zeta^k + \zeta^p) X_i$$

$$= H_i^1 + H_i^2 + \dots + H_i^p + L_i^p$$

۳- طرح حفاظتی پیشنهادی

۳-۱- شناسایی خطا

پس از بررسی رفتار گذرای سیگنال‌های جریان و ولتاژ در انواع خطا شامل خطاهای قطب به قطب (8PN) و قطب به زمین (9PG, 10NG) و همچنین بررسی روابط ریاضی حین خطا که در مرجع [۲۳, ۲۲] ارائه شده است، مشخص گردید که مولفه‌های فرکانسی مشخصی در لحظه وقوع خطا ظاهر می‌گردد که تابع مقاومت و اندوکتانس مسیر خطا می‌باشد. از طرفی جهت استخراج این مولفه عموماً از روش‌های تحلیل سیگنال در حوزه زمان-فرکانس همچون تبدیل موجک استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش تجزیه سیگنال حوزه زمان ITD که دارای ویژگی‌های جذابی همچون سادگی پیاده سازی و عدم نیاز به تنظیم پارامترها بوده است. طرح حفاظتی پیشنهادی که در این مقاله ارائه شده مطابق شکل (۳) بوده که از سیگنال مشتق ولتاژ جهت شناسایی خطا استفاده شده‌است. در این طرح حفاظتی پس از اندازه‌گیری سیگنال ولتاژ و ایجاد پنجره متحرک نمونه برداری به عرض مشخص، مقدار مشتق ولتاژ مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{dV}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V(t_0 + \Delta t) - V(t_0)}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

پس از محاسبه مشتق ولتاژ هریک از قطب‌ها، با اعمال روش ITD سیگنال ورودی به مولفه‌های H و L تجزیه می‌گردد. لازم به ذکر است که تعداد سطوح تجزیه با توجه به ویژگی انتخابی تعیین شده که فرآیند آن در ادامه تشریح می‌گردد. در مرحله بعد انرژی هریک از نمونه‌ها مطابق رابطه (۷) محاسبه شده و در نهایت با توجه به عرض پنجره نمونه برداری، میانگین متحرک انرژی نمونه‌های متوالی مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید. در نهایت با مقایسه مقدار میانگین متحرک با مقدار آستانه از پیش تعیین شده شناسایی خطا انجام می‌پذیرد.

¹¹ Kurtosis

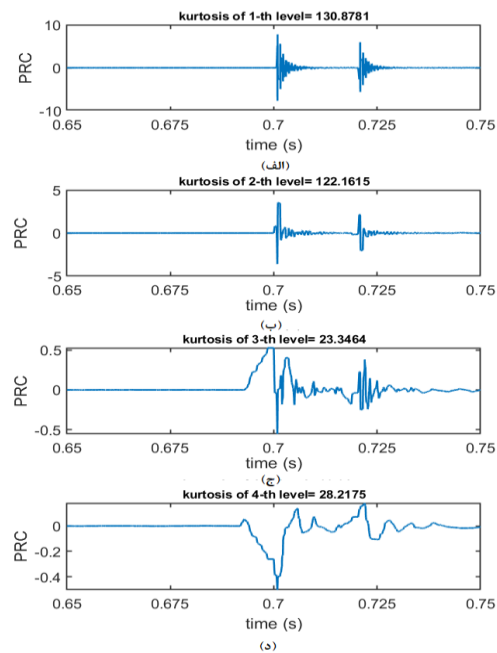
⁸ Positive to negative pole

⁹ Positive pole to ground

¹⁰ Negative pole to ground

$$K = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (9)$$

در رابطه فوق μ و σ به ترتیب معادل میانگین و انحراف معیار سیگنال ورودی x و $E(t)$ معادل مقدار مورد انتظار در زمان t می‌باشد. لذا با توجه به بررسی دینامیک خطای DC، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقدار شاخص پیچیدگی سیگنال ورودی بیشتر باشد، شباهت آن به سیگنال خطای DC بیشتر بوده و شناسایی خطا به کمک آن تسهیل می‌گردد. بدین منظور مقدار این شاخص در سطوح مختلف تجزیه یک سیگنال مشتق ولتاژ خطای PG مطابق شکل (۲) محاسبه شده است. همانگونه که در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد سطح اول تجزیه دارای بیشتری مقدار پیچیدگی بوده که در این طرح حفاظتی نیز از همین ویژگی استفاده می‌شود.



شکل ۲- مقایسه سطوح مختلف تجزیه سیگنال خطای PG

۴-۳- انتخاب مقدار آستانه

از آنجایی که روش‌های حفاظت مبتنی بر اندازه‌گیری در یک پایانه در مقایسه با روش‌ها دوپایانه‌ای از قابلیت انتخاب‌گری ذاتی در تشخیص خطا داخل و خارج زون حفاظتی برخوردار نیستند، لذا تنظیم دقیق مقادیر مرزی در مقاوم بودن طرح حفاظتی در برابر خطاهای خارج زون بسیار تاثیر گذار است. در طرح پیشنهادی ارائه شده مبتنی بر ITD، جهت بدست آوردن مقدار آستانه مقدار شاخص انرژی در حالت نرمال و خطادار مورد بررسی قرار گرفته است. حداقل مقدار آستانه انرژی باید از خطای شدید خارج

از محدوده بیشتر باشد. در نتیجه پس از مدلسازی خطای PN در باس DC و خطای سه‌فاز به زمین در شبکه AC مجاور و همچنین، PG یا PN در انتهای خط انتقال با مقاومت خطای بیشینه (۲۰۰ اهم) می‌توان به حداقل مقدار آستانه جهت شناسایی خطا دست‌یافت. به علاوه به دلیل وجود عوامل اثرگذار بر دقت روش از قبیل نویز اندازه‌گیری، خطای تجهیزات اندازه‌گیری، افزایش عمر راکتورهای محدودکننده جریان خطا و ... باید ضریب اطمینانی در تعیین مقدار نهایی آستانه در نظر گرفت [۲۴] که در این مقاله این ضریب برابر ۲ در نظر گرفته شده و در نهایت مقدار آستانه انتخابی با توجه به طی فرآیند فوق برابر ۲۰ می‌باشد.

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این بخش بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی طرح پیشنهادی پرداخته و نتایج آن مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است، مشخصات سخت افزاری سیستمی که مدلسازی طرح حفاظتی در آن انجام پذیرفته (R) Core(TM) i7-4510U و با فرکانس CPU برابر 2GHz می‌باشد.

۴-۱- سیستم تحت مطالعه

جهت شبیه سازی و بررسی صحت عملکرد طرح‌های حفاظتی پیشنهادی از سیستم نمونه ۴ پایانه‌ای تک قطبی متقارن با ولتاژ نامی ۳۲۰ کیلوولت مطابق شکل (۴) استفاده شده است. این سیستم که در محیط نرم افزاری PSCAD شبیه سازی شده دارای مبدل‌های منبع ولتاژ مدولار نیم پل بوده و سایر اطلاعات سیستم در جدول ۱ آورده شده است [۲۵]. همچنین جهت مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار سیستم در لحظه خطا از مدل خطوط وابسته به فرکانس در کابل و خطوط هوایی مطابق شکل (۵) استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمامی سناریوهای خطا F_1 تا F_9 در خط انتقال ۱۳ و در لحظه ۰.۷ ثانیه شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱- مشخصات سیستم تحت مطالعه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی AC	۴۰۰ kV	L_{SR}	۱۵۰ mH
		MMC1,2,3	MMC4
توان نامی	۹۰۰ MVA		۱۲۰۰ MVA
C_{arm}	۲۹.۳ μF		۳۹ μF
X_{ac}	۱۷.۷ mH		۱۳.۴ mH
R_{ac}	۱.۷۷ Ω		۱.۳۴ Ω
L_{arm}	۸۴.۸ mH		۶۳.۶ mH
R_{arm}	۰.۸۸۵ Ω		۰.۶۷ Ω

۲-۴- خطای داخلی

در این بخش به بررسی عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی در برابر انواع خطاهای PG، PN و NG پرداخته می‌شود. بدین منظور در ۱۰۰ کیلومتری خط انتقال در محل اتصال کابل و شبکه هوایی انواع خطا با مقاومت ۲۰۰ اهم شبیه سازی شده است. همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود مقدار پیک شاخص در خطای PN به علت اتصال کوتاه شدیدتر، بیشتر بوده و از طرفی انرژی قطب خطادار نیز در مقایسه با قطب سالم بیشتر می‌باشد. هرچند مقدار آستانه تعریفی به دلیل پوشش خطای امپدانس بالای انتهای خط از قابلیت انتخاب‌گری مناسبی در خطای شدید ابتدای خط جهت طبقه بندی انواع خطا برخوردار نبوده و این موضوع لزوم تعیین یک شاخص کمکی جهت طبقه بندی خطای داخل محدوده را مشخص تر می‌نماید.

۳-۴- خطای خارجی

عملکرد طرح حفاظتی به ازای خطاهای شدید خارج محدوده و همچنین تغییرات شدید بار نیز مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج آن مطابق شکل (۷) می‌باشد.

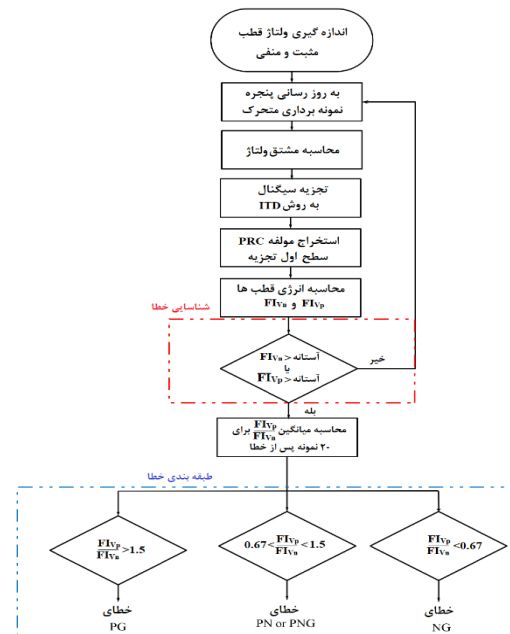
شکل (۷-الف) منحنی جریان خطا به ازای خطای PN با مقاومت ۰.۱ اهم در باس DC مبدل MMC₃ نشان می‌دهد در حالی که شکل (۷-ب) خطای ABCG با مقاومت ۰.۱ در شبکه AC1 را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت رفتار متقارن هر دو قطب در این خطاها می‌باشد. دلیل اصلی انتخاب‌گری طرح حفاظتی پیشنهادی وجود راکتورهای هموارساز ۱۵۰ میلی‌هائری در ابتدا و انتهای خطوط انتقال بوده که منجر به تغییر بخشی از مولفه های فرکانسی ظاهر شده در حین خطا می‌گردد. به علاوه منحنی تغییرات ناگهانی بار از ۸۰۰ مگاوات به ۸۰۰- مگاوات که منجر به تغییر جهت جریان می‌شود در شکل (۷-ج) دیده می‌شود در حالی که تغییرات ولتاژ باس DC به ازای این تغییر شدید بار نسبتاً ناچیز می‌باشد.

۴-۴- آنالیز حساسیت

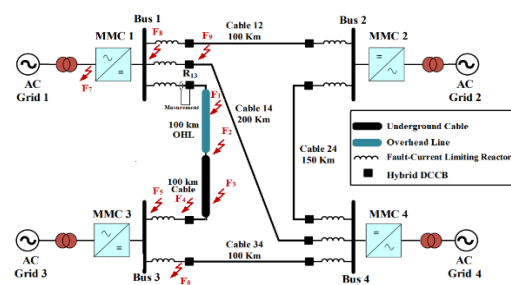
در این بخش به بررسی تاثیر پارامترهای خطا و ملاحظات عملی در پیاده سازی طرح حفاظتی پرداخته می‌شود

تاثیر مقاومت خطا

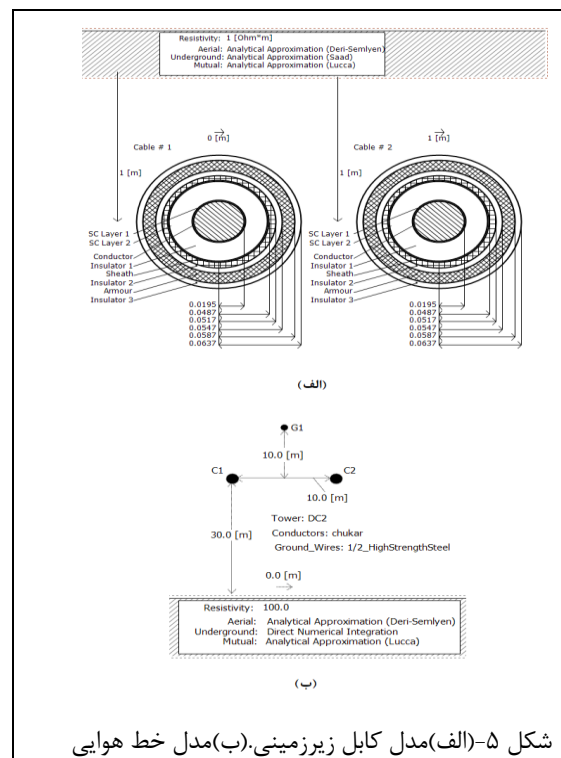
با توجه به بررسی ریاضیات خطا و تاثیر مقاومت خطا بر ولتاژ و جریان در این بخش صحت سنجی عملکرد صحیح طرح حفاظتی پیشنهادی در اثر رخداد خطاهای NG و PN با مقاومت‌های ۰.۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ اهم در انتهای خط انتقال انجام پذیرفته و نتایج آن مطابق جدول ۲ و شکل



شکل ۳-فلوچارت طرح حفاظتی پیشنهادی

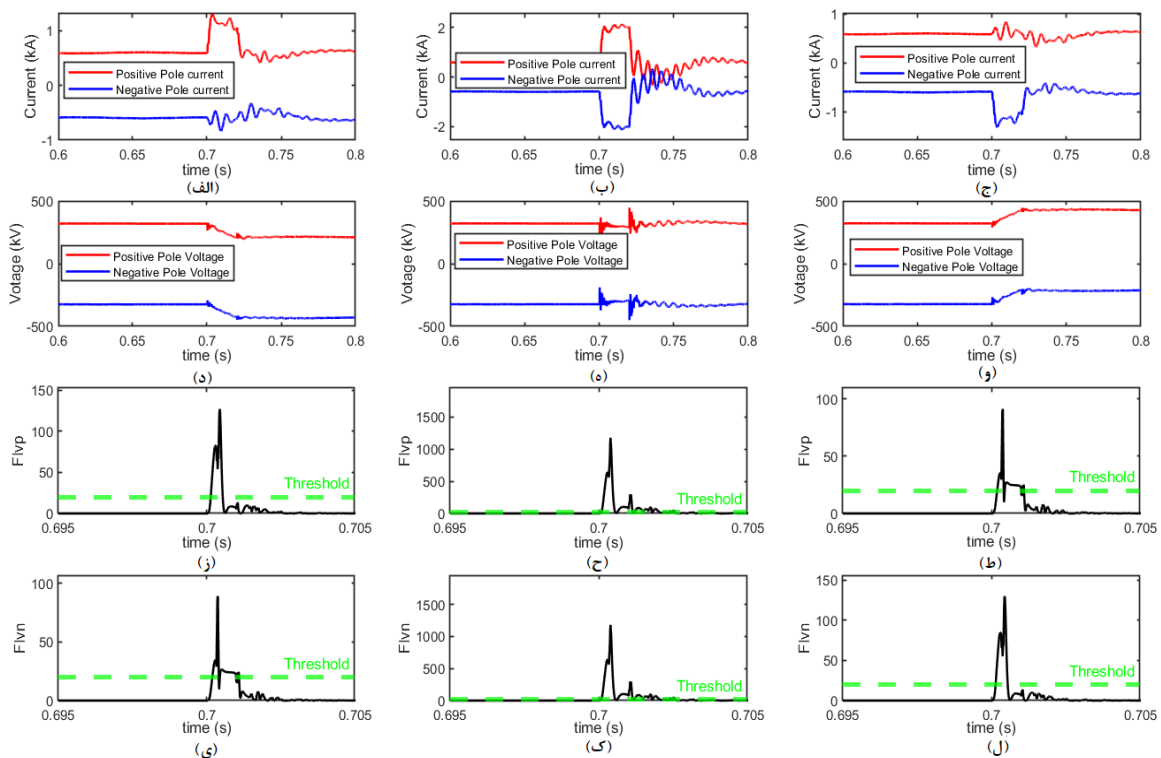


شکل ۴-سیستم تحت مطالعه

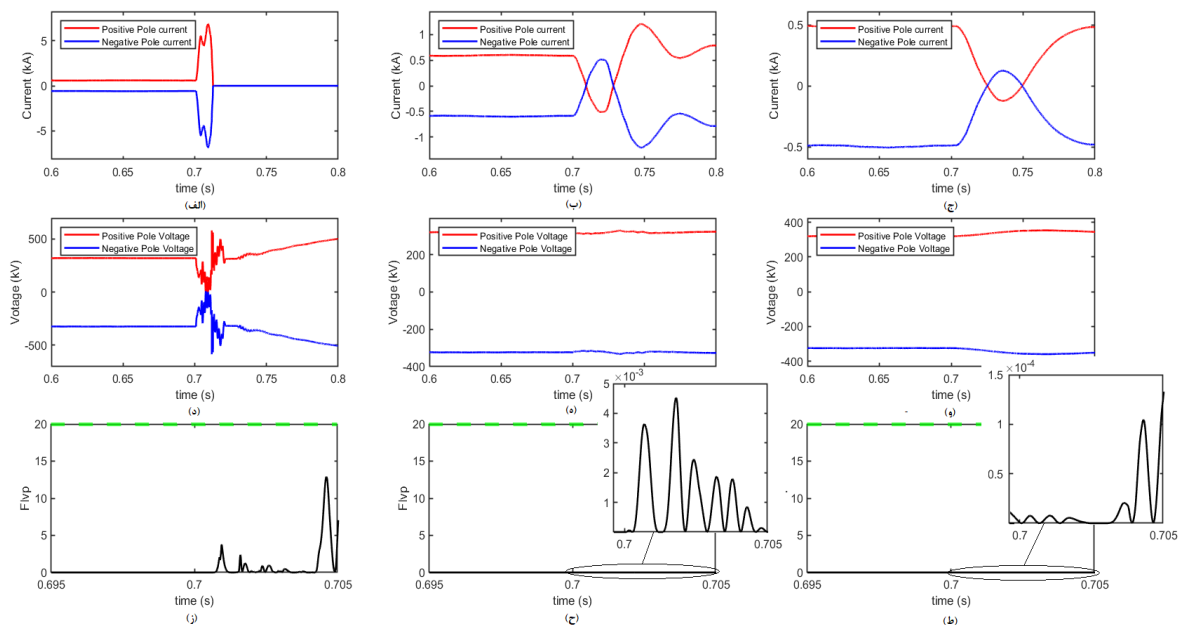


شکل ۵- (الف) مدل کابل زیرزمینی، (ب) مدل خط هوایی

(۸) می باشد. همانطور که در شکل (۸) ملاحظه می شود با افزایش مقاومت انرژی شاخص تعریف شده مبتنی بر مولفه PRC کاهش می یابد. همچنین، مدت زمان شناسایی خطا نیز افزایش می یابد.



شکل ۶- عملکرد طرح حفاظتی به ازای خطای داخلی PG, PN, و NG (الف)-(ج) جریان قطب مثبت و منفی (د)-(و) ولتاژ قطب مثبت و منفی (ز)-(ط) شاخص انرژی قطب مثبت. (ی)-(ل) شاخص انرژی قطب منفی

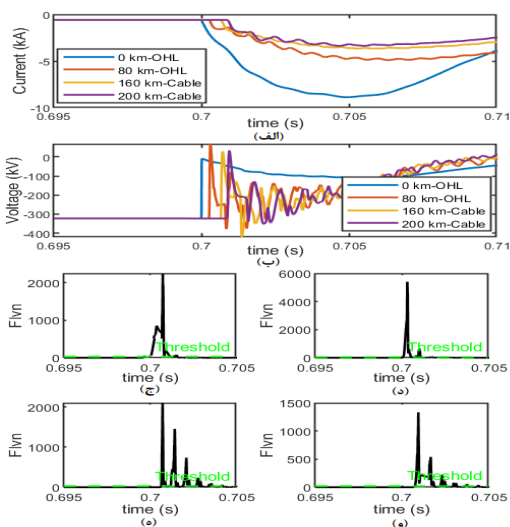


شکل ۷- عملکرد طرح حفاظتی در انواع خطای خارجی شامل خطای PN باس ۳، خطای AC1 ABCG و تغییرات شدید بار (الف)-(ج) جریان قطب مثبت و منفی (د)-(و) ولتاژ قطب مثبت و منفی (ز)-(ط) شاخص انرژی قطب مثبت.

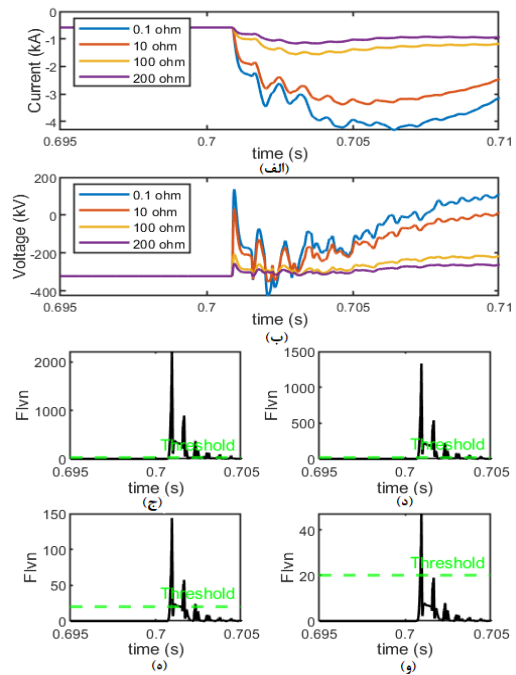
جدول ۳ حداکثر زمان شناسایی خطا مربوط به خطای NG و در انتهای خط انتقال و برابر ۰.۹۶ میلی ثانیه می باشد. به علاوه مقدار شاخص انرژی در لحظه شناسایی خطا در خطاهای PN بیشتر از خطای NG بوده که این مسئله به دلیل شدت اتصال کوتاه بیشتر خطای PN می باشد.

تاثیر نویز

در شبیه سازی طرح های حفاظتی و پیاده سازی آن در رله های هوشمند دو عامل مهم منجر به اختلاف در نتایج می گردد. عامل اول وجود تاخیر در ذاتی بستر مخابراتی جهت دریافت سیگنال ها بوده که در روش های مبتنی بر بستر مخابراتی از قبیل حفاظت دیفرانسیل وجود داشته و عامل دوم خطاهای اندازه گیری می باشد. در این بخش، تاثیر نویز اندازه گیری بر دقت طرح حفاظتی پیشنهادی شناسایی و طبقه بندی خطا مورد بررسی قرار می گیرد. در این راستا، درحالی که سناریوهای شبیه سازی خطا بدون تغییر باقی مانده اند، سطوح مختلفی از نویز گوسی سفید به نمونه های ولتاژ مورد استفاده در روش اعمال گردیده و سپس طرح پیشنهادی روی این داده های نویزی اعمال شده است. همانگونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می گردد، با لحاظ نمودن بدترین شرایط، در یک خطای PG با مقاومت ۲۰۰ اهم در انتهای خط انتقال، سطح سیگنال به نویز از ۴۰ دسی بل تا ۱۰ دسی بل اعمال شده، و روش پیشنهادی در سطح نویز بیش از ۲۰ دسی بل قادر به شناسایی صحیح خطا نمی باشد.



شکل ۹- بررسی اثر محل خطا بر طرح حفاظتی (الف) جریان خطا، (ب) ولتاژ، انرژی قطب منفی به ازای مقاومت (ج) صفر، (د) ۸۰، (ه) ۱۶۰، و (و) ۲۰۰ کیلومتر



شکل ۸- بررسی اثر مقاومت خطا بر طرح حفاظتی (الف) جریان خطا، (ب) ولتاژ، انرژی قطب منفی به ازای مقاومت (ج) ۰.۱، (د) ۱۰، (ه) ۱۰۰، و (و) ۲۰۰ اهم

جدول ۲- اثر مقاومت خطا بر عملکرد طرح حفاظتی

سناریو	نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل خطا (km)	شاخص شناسایی	شاخص طبقه	زمان شناسایی
۱	NG	۰.۱	۲۰۰	۲۳۰۰	۰.۱۲	۰.۳
۲	NG	۱۰	۲۰۰	۱۴۰۰	۰.۴	۰.۵
۳	NG	۱۰۰	۲۰۰	۱۴۷	۰.۵۲	۰.۶
۴	NG	۲۰۰	۲۰۰	۴۹	۰.۶	۰.۹
۵	PN	۰.۱	۲۰۰	۲۱۲۵۰	۰.۹۵	۰.۱
۶	PN	۱۰	۲۰۰	۱۴۳۷۴	۰.۹۸	۰.۱
۷	PN	۱۰۰	۲۰۰	۸۳۰۰	۰.۹۹	۰.۲
۸	PN	۲۰۰	۲۰۰	۷۳۰	۰.۹۹	۰.۳

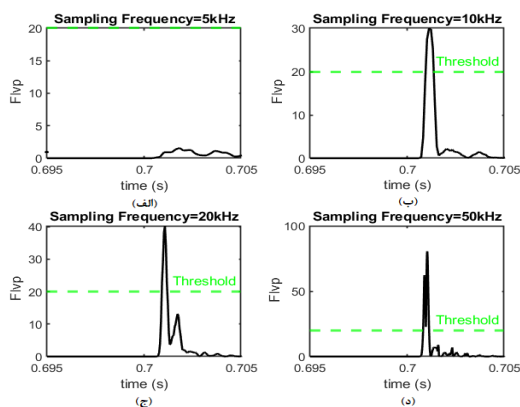
تاثیر محل خطا

از آنجایی قابلیت انتخاب گری طرح حفاظتی اهمیت ویژه ای در مطالعات حفاظتی دارد، لذا جهت بررسی دقت طرح پیشنهادی، بررسی اثر محل وقوع خطا امری ضروری می باشد. بدین منظور، انواع خطاهای NG و PN در نقاط مختلف خط با مقاومت بیشینه (۲۰۰ اهم) مدلسازی شده و نتایج آن مطابق جدول ۳ و شکل (۹) می باشد. طبق نتایج

کاهش فرکانس نمونه برداری، مدت زمان شناسایی به میزان ناچیزی افزایش می‌یابد، اما در صورت کاهش آن به میزان ۵ کیلوهرتز به دلیل عدم امکان نمونه برداری از مولفه‌های فرکانس ناشی از فرکانس پایین نمونه برداری (براساس قضیه نایکوئیست) امکان شناسایی خطا با استفاده از ویژگی انتخابی نبوده، لذا با توجه به ملاحظات عملی و کاهش بار محاسباتی روش، فرکانس نمونه برداری ۱۰ کیلوهرتز در این مطالعات بهینه می‌باشد.

تاثیر مقدار رآکتور هموارساز

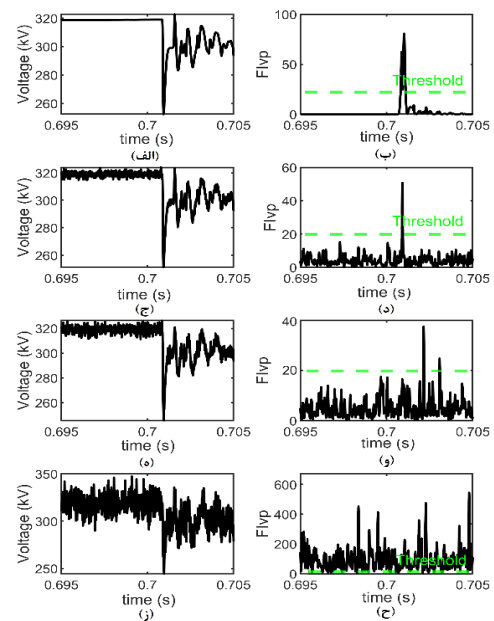
از آنجایی که مقدار رآکتور تاثیر به‌سزایی در میزان انتخاب‌گری طرح حفاظتی پیشنهادی دارد، لذا به ازای تغییرات آن باید عملکرد طرح حفاظتی مورد ارزیابی واقع شود. همچنین، همان‌گونه که از رابطه تحلیل خطا در میدل‌های منبع ولتاژ برمی‌آید، به ازای تغییر مقدار سلف کل حلقه خطا، فرکانس جریان خطا کاهش می‌یابد و برعکس. در نتیجه در صورتی که مقدار سلف کل حلقه خطا که شامل رآکتور هموار ساز نیز می‌گردد، کاهش یابد، آنگاه به دلیل افزایش فرکانس خطا، فرکانس نمونه‌برداری نیز باید به میزان متناسب افزایش یابد. در این بخش به بررسی، نتایج حاصل از عملکرد طرح حفاظتی به ازای تغییرات رآکتور هموار ساز پرداخته شده و نتایج آن مطابق شکل (۱۲) می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج جدول ۴ مشخص می‌شود که در لحظه وقوع خطا تغییرات جریان به ازای افزایش مقدار رآکتور هموارساز کاهش یافته اما در مقابل تغییرات ولتاژ تفاوت معناداری ندارد. لذا استفاده از سیگنال ولتاژ، منجر به افزایش مقاوم بودن طرح حفاظتی نسبت به تغییرات رآکتور را به همراه داشته است.



شکل ۱۱- بررسی اثر فرکانس نمونه برداری بر خطای PG انتهای خط انتقال با (الف) ۵۰، (ب) ۲۰، (ج) ۱۰ و (د) ۵۰ کیلوهرتز

جدول ۳- اثر محل خطا بر عملکرد طرح حفاظتی

سناریو	نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل خطا (km)	شاخص شناسایی	شاخص طبقه بندی	زمان شناسایی
۱	NG	۲۰۰	۰	۲۳۰۰	۰.۰۹	۰.۳
۲	NG	۲۰۰	۸۰	۱۴۰۰	۰.۴۱	۰.۴۲
۳	NG	۲۰۰	۱۶۰	۱۴۷	۰.۵۲	۰.۵۵
۴	NG	۲۰۰	۲۰۰	۴۹	۰.۶	۰.۹
۵	PN	۲۰۰	۰	۹۳۰	۰.۹۶	۰.۱
۶	PN	۲۰۰	۸۰	۸۶۳	۰.۹۹	۰.۲۹
۷	PN	۲۰۰	۱۶۰	۷۹۲	۰.۹۹	۰.۳۲
۸	PN	۲۰۰	۲۰۰	۷۳۰	۰.۹۹	۰.۴۵

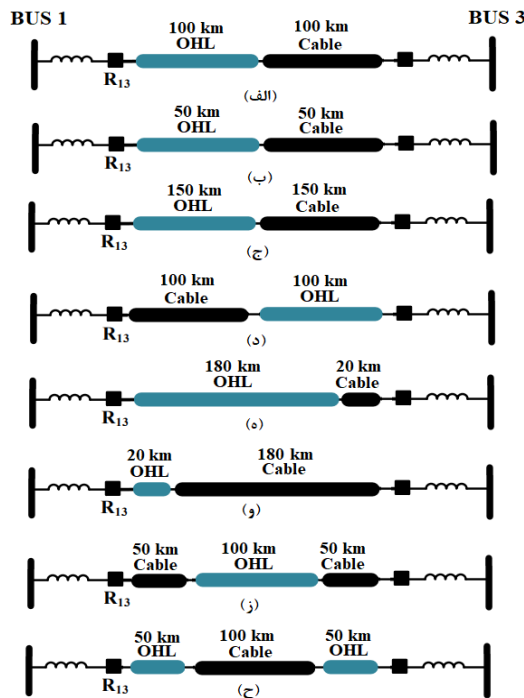


شکل ۱۰- بررسی اثر سطوح مختلف نویز بر خطای NG انتهای خط انتقال (الف) ۴۰، (ب) ۳۰، (ج) ۲۰ و (د) ۱۰ دسی‌بل

تاثیر فرکانس نمونه برداری

در این بخش جهت بررسی اثر فرکانس نمونه‌برداری، یک خطای PG در انتهای خط انتقال و با مقاومت ۲۰۰ اهم در نظر گرفته شده و سیگنال ولتاژ اندازه‌گیری شده با فرکانس نمونه برداری ۲۰، ۵۰، ۱۰ و ۵ کیلوهرتز به طرح پیشنهادی اعمال شده است و نتایج آن مطابق شکل (۱۱) می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد، به ازای

لازم به ذکر است که در تمامی این سناریوها یک خطای انتهایی خط PG با مقاومت ۲۰۰ اهم شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۳- سناریوهای مختلف بهره‌برداری از خطوط ترکیبی

تأثیر تغییر طول خط انتقال

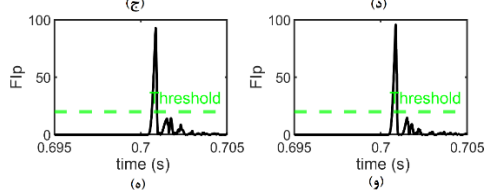
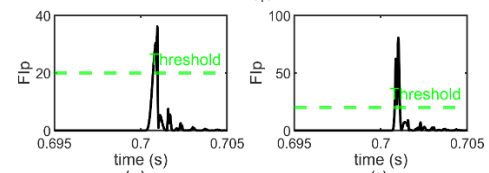
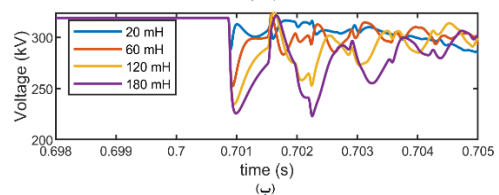
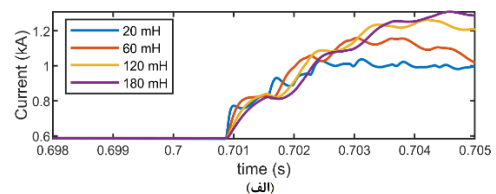
در این بخش جهت بررسی میزان مقاوم بودن روش پیشنهادی، با تغییر طول خط انتقال مطابق شکل (۱۴) نتایج عملکرد مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور با طول خطوط ۰.۵، ۱.۵ و ۲ برابر طول اولیه (۱۰۰ کیلومتر کابل زیر زمینی و ۱۰۰ کیلومتر خط هوایی) شبیه‌سازی تکرار و نتایج مطابق شکل (۱۴) بدست آمد. همانگونه که از این شکل برمی‌آید، طرح حفاظتی پیشنهادی تا ۱.۵ برابر طول خط اصلی (۳۰۰ کیلومتر) قادر به شناسایی بوده ولی به ازای طول بیشتر به علت افزایش امپدانس مسیر، شناسایی خطا میسر نمی‌باشد.

تأثیر تغییر درصد خطوط

در این بخش با توجه به تغییر درصد میزان کابل زیرزمینی و خط هوایی نتایج استخراج گردید که مطابق شکل (۱۵) می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به میزانی که درصد خط هوایی در لینک DC افزایش می‌یابد بخشی از مولفه‌های فرکانسی میرا شده و در نتیجه شناسایی خطا با چالش روبه‌رو خواهد شد. هرچند مقدار آستانه تعیین شده امکان شناسایی خطا به ازای سناریوهای مختلف از

جدول ۴- اثر راکتور هموارساز بر عملکرد طرح حفاظتی

سناریو	نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل خطا (km)	مقدار راکتور (mH)	شاخص شناسایی	زمان شناسایی
۱	PG	۲۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۳۰۰	۰.۶
۲	PG	۲۰۰	۲۰۰	۴۰	۱۴۰۰	۰.۸۵
۳	PG	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۱۴۷	۰.۹
۴	PG	۲۰۰	۲۰۰	۸۰	۴۹	۰.۹
۵	PG	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۰	۹۳۰	۰.۹
۶	PG	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰	۸۶۳	۰.۹



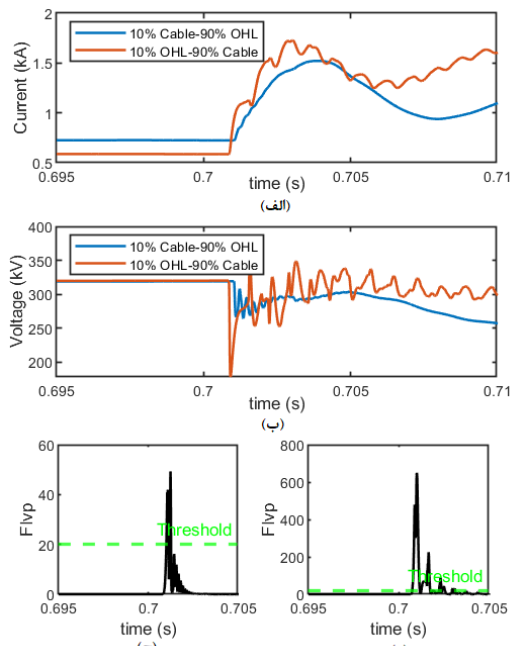
شکل ۱۲- بررسی اثر مقدار راکتور بر عملکرد طرح

حفاظتی (الف) جریان قطب مثبت (ب) ولتاژ قطب مثبت، انرژی قطب مثبت به ازای سلف به مقدار (ج) ۲۰، (د) ۶۰، (ه) ۱۲۰، و (و) ۱۸۰ میلی‌هنری

۴-۵- سناریوهای خطوط ترکیبی

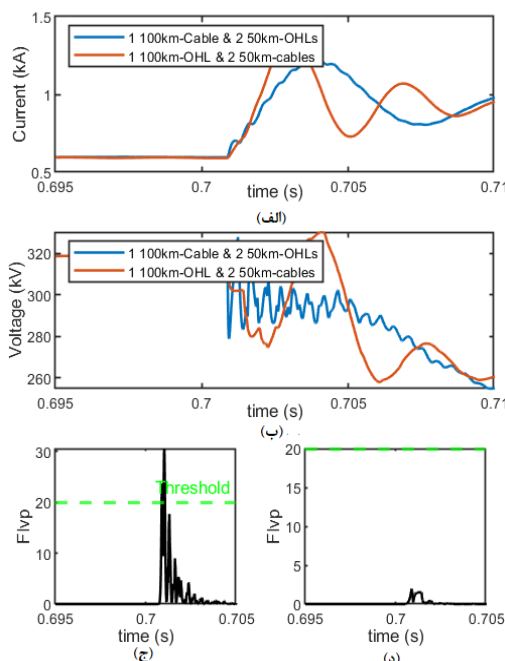
در این بخش به بررسی انواع سناریوهای محتمل در بهره‌برداری از خطوط ترکیبی مطابق شکل (۱۳) پرداخته و عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی در آنها بررسی می‌گردد.

قوت و ضعف آن پرداخته شده و نتایج آن مطابق جدول ۵ می‌باشد.



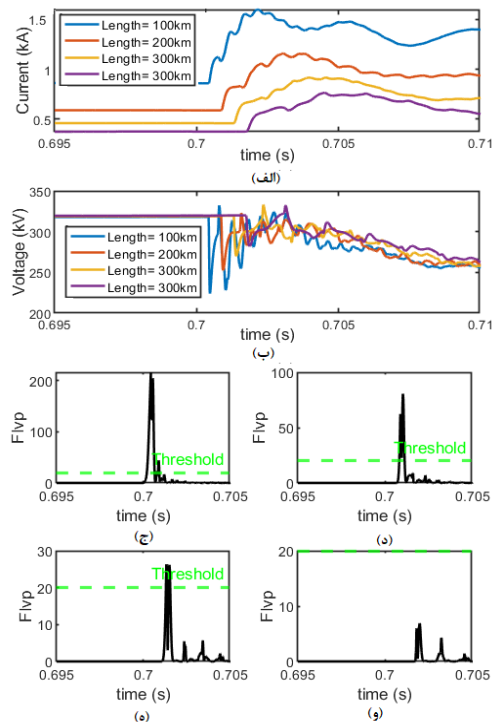
شکل ۱۵-تاثیر درصد خطوط بر عملکرد طرح

حفاظتی. (الف) جریان (ب) ولتاژ و شاخص انرژی قطب مثبت به ازای خط انتقال (ج) ۱۰ درصد کابل و ۹۰ درصد خط هوایی (د) ۹۰ درصد کابل و ۱۰ درصد خط هوایی



شکل ۱۶-تاثیر افزایش بخش کابلی یا هوایی بر عملکرد طرح حفاظتی. (الف) جریان (ب) ولتاژ و شاخص انرژی قطب مثبت به ازای (ج) ۲ خط هوایی ۵۰ و یک کابل ۱۰۰ کیلومتری (د) ۲ کابل ۵۰ و یک خط هوایی ۱۰۰ کیلومتری

جمعه خط ۲۰۰ انتقال کیلومتری تماما کابلی یا تماما هوایی را دارا می‌باشد.



شکل ۱۴-تاثیر طول خط انتقال بر عملکرد طرح حفاظتی. (الف) جریان (ب) ولتاژ و شاخص انرژی قطب مثبت به ازای طول خط (ج) ۱۰۰ (د) ۲۰۰ (ه) ۳۰۰ (و) ۴۰۰ کیلومتر

تاثیر افزایش تعداد خطوط ترکیبی

یکی دیگر از سناریوهایی که در زمینه شناسایی خطا خطوط ترکیبی می‌تواند حائز اهمیت باشد، بررسی میزان مقاوم بودن طرح حفاظتی در اثر افزایش بخش های کابلی یا هوایی هست چرا که با افزایش این بخش ها به دلیل ایجاد نقاط شکست امواج متعدد، امکان استفاده از استفاده از روش های امواج سیار بسیار دشوار می‌گردد. بدین منظور دو سناریو شکل (۱۳-ز و ح) با افزایش یک بخش کابلی و یک بخش هوایی با عدم تغییر طول خط انتقال بررسی شده و که نتایج آن مطابق شکل (۱۶) می باشد.

همانگونه که در شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود به ازای افزایش بخش های کابلی بخشی از محتوای فرکانسی میراشده و عملا طرح حفاظتی قادر به شناسایی خطا نمی‌باشد، در حالیکه به در سناریویی که ۲ خط هوایی وجود داشته شناسایی خطا بدون مشکل انجام پذیرفته است.

مقایسه روش پیشنهادی با مطالعات پیشین

در این بخش به مقایسه کمی و کیفی طرح حفاظتی پیشنهادی با مطالعات پیشین جهت مشخص شدن نقاط

جدول ۵- مقایسه روش پیشنهادی با مطالعات پیشین

مورد مراجع	مبنای روش	زمان شناسایی (ms)	سیگنال ورودی	فرکانس نمونه برداری (kHz)	بار محاسباتی	حداکثر مقاومت خطا	بستر مخابراتی	اثر نویز (dB)
[۱۵]	SWT	۲	جریان	۱۳۵	زیاد	۵۰۰	بله	۲۸
[۹]	حوزه زمان	۱۰	ولتاژ و جریان	-	کم	-	بله	خیر
[۱۴]	TW	۱۰	ولتاژ و جریان	۱۰۰۰	زیاد	۲۰۰	بله	خیر
[۱۰]	TW	۱	ولتاژ و جریان	۲۰۰۰	زیاد	۱۰۰	بله	بله
[۱۷]	DWT-SVM	۱	ولتاژ و جریان	۲۰۰	زیاد	۱۰۰	خیر	بله
[۷]	حوزه زمان	۲	ولتاژ و جریان	۵	کم	۵۰۰	بله	۲۰
روش پیشنهادی	ITD	۱ <	ولتاژ	۱۰	کم	۲۰۰	خیر	۲۰

۵- نتیجه گیری

کنار فرکانس نمونه برداری پایین می توان به زمان شناسایی کمتر از ۱ میلی ثانیه و همچنین مقاومت در برابر نویز نسبتا شدید تا ۱۰ دسی بل اشاره نمود. در نهایت میزان مقاوم بودن طرح حفاظتی در شرایط مختلف بهره برداری از خطوط ترکیبی کابل زیرزمینی و خط هوایی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. لازم به ذکر است که علی رغم تمام مزایای ذکر شده، طرح پیشنهادی دارای محدودیت های ذاتی از قبیل حساسیت به نویز و مقدار آستانه بوده که بهبود آن میتواند از موضوعات مورد توجه در مطالعات آتی باشد.

در این مقاله یک روش شناسایی و طبقه بندی خطا مبتنی بر پردازش سیگنال حوزه زمان با قابلیت هایی از قبیل سادگی، عدم نیاز به تنظیم پارامترها در خطوط MTDC ترکیبی ارائه گردید. روش شناسایی و طبقه بندی در این طرح حفاظتی مبتنی بر استخراج ویژگی کارآمد حاصل از تجزیه مشتق ولتاژ خطا به روش ITD بوده و عملکرد آن در سناریوهای مختلف خطای داخل و خارج محدوده حفاظتی ارزیابی گردید. از مزایای این روش حفاظتی در

مراجع

- [1] J. Setreus, and L. Bertling. "Introduction to HVDC technology for reliable electrical power systems." In *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp. 1-8. IEEE, 2008.
- [2] K. Sharifabadi, L. Harnefors, H.P. Nee, S. Norrga, and R. Teodorescu. Design, control, and application of modular multilevel converters for HVDC transmission systems. *John Wiley & Sons*, 2016.
- [3] D.V. Hertem, O. Gomis-Bellmunt, and J. Liang. HVDC grids: for offshore and supergrid of the future. *John Wiley & Sons*, 2016.
- [4] M.N. Sakib, S.P. Azad, and M. Kazerani. "A critical review of modular multilevel converter configurations and submodule topologies from DC fault blocking and ride-through capabilities viewpoints for HVDC applications." *Energies* 15, no. 11 (2022): 4176.
- [5] M.A. Ikhide. "DC line protection for multi-terminal High Voltage DC (HVDC) transmission systems." *PhD diss, Staffordshire University*, 2017.
- [6] D. Tzelepis. "Protection, fault location & control in high voltage multi terminal direct current (HV-MTDC) grids." (2017).

- [7] V. Nougain, and S. Mishra. "Current-limiting reactors based time-domain fault location for high-voltage DC systems with hybrid transmission corridors." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72 (2022): 1-10.
- [8] O.M.K.K. Nanayakkara, a. "Line fault location in emerging HVDC transmission systems." (2014).
- [9] P.T. Lewis, B.M. Grainger, H.A. Al Hassan, A. Barchowsky, and G.F. Reed. "Fault section identification protection algorithm for modular multilevel converter-based high voltage DC with a hybrid transmission corridor." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, no. 9 (2016): 5652-5662.
- [10] O.K. Nanayakkara, A.D. Rajapakse, and R. Wachal. "Location of DC line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements." *IEEE transactions on power delivery* 27, no. 1 (2011): 279-288.
- [11] H.A. Al Hassan, B.M. Grainger, T.E. McDermott, and G.F. Reed. "Fault location identification of a hybrid HVDC-VSC system containing cable and overhead line segments using transient data." In *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [12] Y. Zhang, and T. Li. "Fault location for overhead and cable hybrid transmission lines based on the difference quantities of forward propagating waves and backward propagating waves in HVDC systems." *Electric Power Systems Research* 203 (2022): 107642.
- [13] Z. Yanxia, , and L. Ting. "Fault location for overhead and cable hybrid DC line based on the energy transmission characteristics." *Electric Power Systems Research* 221 (2023): 109414.
- [14] P. Verrax, N. Alglave, A. Bertinato, M. Kieffer, and B. Raison. "Low-complexity graph-based traveling wave models for HVDC grids with hybrid transmission lines: Application to fault identification." *Electric Power Systems Research* 205 (2022): 107710.
- [15] D. Tzelepis, G. Fusiek, A. Dyśko, P. Niewczas, C. Booth, and X. Dong. "Novel fault location in MTDC grids with non-homogeneous transmission lines utilizing distributed current sensing technology." *IEEE Transactions on smart grid* 9, no. 5 (2017): 5432-5443.
- [16] P. Tunnerhoff, M. Stumpe, and A. Schnettler. "Fault analysis of HVDC systems with partial underground cabling." (2017): 19-6.
- [17] H. Livani, and C. Yaman Evrenosoglu. "A single-ended fault location method for segmented HVDC transmission line." *Electric Power Systems Research* 107 (2014): 190-198.
- [18] A. Imani, Z. Moravej, and M. Pazoki. "A novel time-domain method for fault detection and classification in VSC-HVDC transmission lines." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 140 (2022): 108056.
- [19] M.G. Frei, and I. Osorio. "Intrinsic time-scale decomposition: time–frequency–energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463, no. 2078 (2007): 321-342.
- [20] M. Pazoki. "A new fault classifier in transmission lines using intrinsic time decomposition." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, no. 2 (2017): 619-628.
- [21] M. Pazoki. "A new DC-offset removal method for distance-relaying application using intrinsic time-scale decomposition." *IEEE Transactions on Power Delivery* 33, no. 2 (2017): 971-980.
- [22] A. Ukil, Y.M.Yeap, and K. Satpathi. *Fault analysis and protection system design for DC grids*. Berlin: Springer, 2020.
- [23] B. Li, J. He, J. Tian, Y. Feng, and Y. Dong. "DC fault analysis for modular multilevel converter-based system." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 5 (2017): 275-282.
- [24] N.K. Sharma, S.R. Samantaray, and C.N. Bhende. "VMD-enabled current-based fast fault detection scheme for DC microgrid." *IEEE Systems Journal* 16, no. 1 (2021): 933-944.
- [25] W. Leterme, N. Ahmed, J. Beerten, L. Ängquist, D.V. Hertem, and S. Norrga. "A new HVDC grid test system for HVDC grid dynamics and protection studies in EMT-type software." In *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, pp. 1-7. IET, 2015.