Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.188

Very Fast Adaptive Single-pole Auto-reclosing in High-Voltage Transmission Lines

Mojtaba Aliyari[1] , Mohsen Jannati[2] , Milad Dowlatshahi[3] , Mohammad Mahdi Rezaei[4]

[1] PhD student, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran
mojtaba.aliyari@iaukhsh.ac.ir
[2] Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran
m.jannati@shr.ui.ac.ir
[3] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran
dolatshahi@iaukhsh.ac.ir
[4] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran
mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

Abstract:

High-voltage transmission lines are very important in power systems. Since most of the faults occurring in these lines are single-phase-to-ground and transient type, the operation speed of the single-pole automatic reclosing relays will play very important role in the stability of the power system. In this article, a very fast protection algorithm based on cumulative sum (CUSUM) is proposed to improve the performance of single-pole reclosing relays. The proposed scheme operates by sampling the terminal voltage of one side of the high voltage transmission line. Then by applying CUSUM on the sampled voltage and applying the corresponding settings, the reclosing moment of the faulty phase is determined. The results of extensive simulations in the EMTP-RV software environment on a sample 400-kV power system show that the proposed protection scheme has been very accurate in identifying the successful reclosing moment. The very high speed of the proposed method, the lack of noise and the very low computational complexity of the method provide its usage for practical applications.

Keywords: Transient Faults, High-Voltage Transmission Line, Adaptive Single-Pole Auto-Reclosing, and CUSUM.

Article Type: Research

Received: 06. 01. 2023

Revised: 06. 03. 2023

Accepted: 11. 06. 2023

Corresponding author: Mohsen Jannati

Corresponding author's address: 3 Km Shahreza-Dehaqan Road, Shahreza campus, University of Isfahan, Iran,

Postal Code: 8174673441

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

Copyright © 2024 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

.

1. Introduction

Transmission lines are an inevitable part of power systems, whose performance and efficiency have a significant impact on the stability of the system. Due to the fact that the transmission lines are directly exposed to the surrounding environment without covering, the occurrence of faults in these lines is one of the most serious problems that greatly affects the quality of the supplied electricity. Between 80% and 90% of these faults are single-phase-to-ground. Single-phase-to-ground faults are divided into two categories, transient and permanent, where most of these faults are transient in nature [1]. In permanent faults, due to an incident in the power system, an electric arc is established, which causes changes in the electrical characteristics of the transmission network. In contrast to permanent faults, in transient faults, the fault is automatically cleared and does not affect the characteristics of the transmission network and its equipment, and after disconnecting the circuit breakers (CBs) of the transmission line and completely extinguishing the arc, the fault location regains its insulating properties and the transmission line can be used again [2]. When a transient single-phase-to-ground fault occurs in the transmission line, using a single-pole automatic reclosure (SPAR) scheme, the line can be re-energized after the transmission line is disconnected and the cause of the fault is removed in a short period of time. These relays are activated when the CBs are opened due to an fault, and send the reclosing command to the CBs in a short period of time. SPARs themselves are classified into two groups: adaptive SPARs (ASPAR) and non-adaptive SPARs. The non-adaptive SPAR relay operates on a fixed time basis, i.e., it returns the detected faulty phase to the grid after a fixed time delay. It should be noted that in these relays the automatic reclosing operation can cause serious damage to the power system if it is done for a permanent fault. Unlike the non-adaptive SPARs, the ASPAR relay sends the reclosing command to the push buttons after the secondary arc is extinguished, otherwise it is blocked. As a result, unsuccessful reclosing is avoided.

So far, different algorithms have been presented for ASPAR. For example, in [3] an ASPAR algorithm have been proposed based on Discrete Fourier Transform (DFT) and THD index. In [4], an ASPAR technique is proposed for high-voltage transmission lines using artificial neural networks (ANN). Most of the proposed methods, despite having suitable advantages, have serious disadvantages, including the need to determine the threshold limit, use only in lines equipped with reactors, delay in identifying the reclosing moment, and the need for telecommunication equipment. In addition to the mentioned cases, these methods often have a significant computational burden, which makes their practical implementation difficult for real applications.

2. Proposed Protection Scheme

Failure to recognize the operating time in the reclosing relay and the continued presence of a transient fault in the transmission network can lead to irreparable economic and social damage. Therefore, in order to increase the level of safety, stability and reliability of the power system, it is necessary to detect the reclosing time reliably and quickly. In this paper, to overcome the mentioned problems, a novel protection scheme based on CUSUM is proposed. The very high speed of the proposed method compared to other methods, no need for a high sampling rate, robustness to noise, high accuracy in detecting the time of successful reclosing, along with the possibility of very simple practical implementation, are among the great advantages of the proposed method.

3. Simulation Results

3.1. Statistical evaluation of the proposed protection scheme in different network modes

To evaluate the validity of the proposed method, 1200 different faults, including 800 single-phase-to-ground transient fault data as well as 400 single-phase-to-ground permanent fault data, are extracted from the network under study with a sampling rate of 1.2 kHz. To generate the required data, different network modes including: different fault impedances, different fault locations and phases, whether or not the transmission line is transposed, different fault arc models, different fault initiation angles, different power factors and the presence of noise with signal-to-noise ratio (SNR) from 10 to 40 are considered. According to the obtained results, it can be said:

1) In 793 cases out of 800 transient faults, the proposed method has correctly identified the moment of secondary arc shutdown, which shows that the accuracy of the proposed method in identifying the moment of reconnection is equal to 99.12%.

2) The proposed method has not correctly issued a command in 395 out of 400 cases of permanent errors.

The obtained results indicate the effective performance of the proposed protection algorithm.

3.2. Comparison of the proposed algorithm with other designs

It should be noted that compared to the methods presented in the literature, the method proposed in this paper has the fastest speed to identify the moment of secondary arc extinction. In addition, the computational burden of the proposed method is very low due to the very simple structure of CUSUM, which makes its practical implementation very simple. In summary, the advantages of the proposed scheme are:

- Very high speed of the proposed method.
- Very simple practical implementation,
- Not depending on the threshold value,

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

- No need for a high sampling rate,
- No effect of noise on the performance of the proposed scheme, and
- Correct operation in different network configurations.

4. Conclusion

In this paper, a new protection algorithm lines is presented for fast and reliable reclosing in high-voltage transmission. The proposed method, which is based on the CUSUM method, identifies the moment of successful reclosing by sampling the transmission line voltage. In order to investigation the performance of proposed algorithm, a sample 400 kV network is studied in the EMTP-RV software in different conditions including different types of fault impedances, different locations and phases of the fault, whether the transmission line is transposed or not, different models of the fault arc, different angles of the fault start, different power factor and the presence of noise with SNR from 10 to 40. The obtained results indicate the ability of the proposed protection scheme to detect the moment of secondary arc extinction. The very high speed of the proposed method compared to other proposed methods, no need for a high sampling rate, high accuracy in detecting the time of successful reclosing, along with the possibility of very simple implementation, make the proposed method very suitable for practical applications.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۸۸-۱۹۷

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.188

وصل مجدد خودکار تک‌فاز تطبیقی بسیار سریع در خطوط انتقال فشارقوی

مجتبی علی یاری[۱]، محسن جنتی[۲]، میلاد دولتشاهی[۳]، محمدمهدی رضایی[۴]

۱- دانشجوی دکتری- گروه برق- واحد خمینی شهر- دانشگاه آزاد اسلامی- خمینی شهر- اصفهان- ایران
mojtaba.aliyari@iaukhsh.ac.ir

۲- دانشیار- گروه مهندسی برق- مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران
m.jannati@shr.ui.ac.ir

۳- استادیار- گروه برق- واحد خمینی شهر- دانشگاه آزاد اسلامی- خمینی شهر- اصفهان- ایران
dolatshahi@iaukhsh.ac.ir

۴- استادیار- گروه برق- واحد خمینی شهر- دانشگاه آزاد اسلامی- خمینی شهر- اصفهان- ایران
mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

چکیده: با توجه به اهمیت بسیار بالای خطوط انتقال فشارقوی در سیستم‌های قدرت و اینکه اکثر خطاهای رخ داده در این خطوط تک‌فاز به زمین و از نوع گذرا هستند، سرعت عملکرد رله بازبست اتوماتیک تک‌فاز به زمین نقش بسیار مهمی در پایداری سیستم قدرت خواهد داشت. از این رو در این مقاله یک الگوریتم حفاظتی بسیار سریع مبتنی بر CUSUM جهت بهبود عملکرد رله وصل مجدد تک‌فاز پیشنهاد گردیده است. طرح پیشنهادی بدین صورت عمل می‌کند که از ولتاژ ترمینال یک طرف خط انتقال فشارقوی نمونه‌برداری می‌کند. سپس با اعمال CUSUM بر روی ولتاژ نمونه‌برداری شده و اعمال تنظیمات مربوطه، لحظه وصل مجدد فاز معیوب تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های گسترده در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV بر روی یک سیستم قدرت نمونه ۴۰۰ kV نشان میدهد که طرح حفاظتی پیشنهادی در شناسایی لحظه بازبست موفقیت‌آمیز بسیار دقیق عمل کرده است. سرعت بسیار بالای روش پیشنهادی، عدم نویزپذیری و پیچیدگی محاسباتی بسیار پایین روش، استفاده از آن را برای کاربردهای صنعتی فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال فشارقوی، خطای گذرا و دائم، بازبست اتوماتیک تک‌فاز تطبیقی و CUSUM

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محسن جنتی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – اصفهان – شهرضا – دانشگاه اصفهان – مرکز آموزش عالی شهرضا – گروه مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

خطوط انتقال بخشی اجتناب‌ناپذیر از سیستم‌های قدرت هستند که عملکرد و کارایی آن‌ها تأثیر بسزایی در پایداری شبکه برق دارد. با توجه به اینکه خطوط انتقال مستقیماً و بدون پوشش با محیط اطراف خود در ارتباط می‌باشند، بروز خطا در این خطوط یکی از جدی‌ترین مشکلات است که تا حد زیادی بر کیفیت برق عرضه شده تأثیر می‌گذارد [۱]. بین ۸۰٪ تا۹۰٪ از این خطاها از نوع تک‌فاز به زمین می‌باشند. خطاهای تک‌فاز به زمین خود به دو دسته گذرا و دائمی تقسیم می‌شوند که غالب این خطاها ماهیت گذرا دارند [۲]. در خطاهای دائمی به سبب بروز یک حادثه در شبکه قدرت، قوس الکتریکی برقرار شده که این قوس باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات الکتریکی شبکه انتقال می‌شود. از جمله این خطاها می‌توان به شکست عایقی مقره‌ها، پاره‌شدن هادی‌های فازها، مشکلات مربوط به دکل‌ها و غیره اشاره کرد که بهره‌برداری مجدد از تجهیز خطا دیده را تا زمان رفع نقص غیرممکن می‌سازد. برخلاف خطاهای دائمی، در خطاهای گذرا نقص به وجود آمده خودبه‌خود برطرف می‌شود و تأثیری بر مشخصات شبکه انتقال و تجهیزات آن ندارد و پس از قطع کلیدهای فشارقوی خط انتقال و خاموش‌شدن کامل قوس، محل خطا خاصیت عایقی خود را بازمی‌یابد و خط انتقال مجدداً قابل بهره‌برداری می‌باشد [۳]. هنگامی‌که یک خطای تک‌فاز به زمین گذرا در خط انتقال رخ دهد، با استفاده از یک طرح بازبست خودکار تک‌فاز (SPAR[۱]) می‌توان پس از قطع خط انتقال و برطرف شدن علت خطا در یک مدت زمان کوتاه، خط را دوباره برق‌دار نمود و از وقفه‌های طولانی مدت در تأمین برق مصرف‌کنندگان جلوگیری کرد. بنابراین در همه مواردی که مشکلاتی کوتاه مدت ایجاد می‌شود، رله SPAR به کار خواهد رفت. این رله‌ها با باز شدن کلیدهای فشارقوی به دلیل وقوع خطا فعال‌شده و در مدت‌زمان کوتاهی دستور وصل مجدد را برای کلیدها ارسال می‌کنند. SPARها خود به دو گروه تطبیقی (ASPAR[۲]) و غیرتطبیقی دسته‌بندی می‌شوند. رله SPAR غیرتطبیقی بر اساس یک‌زمان ثابت کار می‌کند، یعنی فاز خطا دیده را (صرف نظر از دائمی یا گذرا بودن خطا) بعد از یک تأخیر زمانی ثابت به شبکه بر می‌گرداند. در این رله باید توجه نمود که عملیات بازبست خودکار در صورتی‌که برای خطای دائمی صورت بپذیرد می‌تواند لطمات جدی به سیستم قدرت وارد سازد. برخلاف نوع غیرتطبیقی، رله ASPAR پس از خاموش‌شدن قوس ثانویه (در صورت گذرا بودن خطا) فرمان وصل مجدد را برای کلیدهای فشارقوی ارسال می‌کند و در غیر این صورت (در صورت دائمی بودن خطا) مسدود می‌شود. در نتیجه از وصل مجدد ناموفق جلوگیری می‌شود.

از همین رو محققین تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای ASPAR پیشنهاد داده‌اند. به عنوان مثال محققان در [۴] یک الگوریتم ASPAR بر اساس تبدیل فوریه گسسته (DFT[۳]) و شاخص THD[۴] پیشنهاد داده‌اند. در [۵] یک تکنیک ASPAR برای خطوط انتقال فشارقوی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN[۵]) پیشنهاد داده شده است. [۶] یک طرح شناسایی هوشمند برای خطاهای گذرا در خطوط انتقال فشارقوی با استفاده از تبدیل گابور (GT[۶]) و ANN ارائه داده است. روش‌های مبتنی بر ANN ها برای کاربرد زمان واقعی در رله‌های حفاظتی مناسب نمی‌باشند. پژوهشگران در [۷] روشی را برای مسدود کردن وصل مجدد برای خطاهای دائمی فاز به زمین در خطوط چند مداره با استفاده از اندازه‌گیری‌های هم‌زمان از دو طرف خط ارائه داده‌اند. وابستگی به اطلاعات دو طرف خط انتقال از محدودیت‌های این روش می‌باشد. در الگوریتم ارائه شده در [۸]، یک مقدار آستانه تعریف شده است به گونه‌ای که اگر اختلاف بین جذر میانگین مربعات ولتاژ فاز خطا دیده در دو لحظه متوالی از مقدار آستانه تعیین‌شده بیشتر باشد، دلیل بر خاموش شدن قوس ثانویه می‌باشد و در نتیجه صدور فرمان وصل مجدد بلامانع خواهد بود. تعیین مقدار آستانه یک عیب برای این روش می‌باشد. یک ASPAR مبتنی بر ضربان نوسانات فرکانس گذرای ولتاژ ریکاوری برای خطوط فشارقوی جبران‌شده با راکتور موازی برای تشخیص زمان خاموش شدن قوس ثانویه در [۹] ارائه شده است. در [۱۰] از این خاصیت که تعداد فرکانس‌های نوسانی جریان فاز خطا دیده در راکتورهای موازی قبل و بعد از برطرف شدن خطا با هم متفاوت است جهت تشخیص خطاهای گذرا استفاده نموده است. عیب این دو روش آن است که صرفاً برای خطوط مجهز به راکتور قابل استفاده می‌باشد. در [۱۱] روشی مبتنی بر آنالیز هارمونیکی و با استفاده از تبدیل TT برای تشخیص خاموش‌شدن قوس ثانویه پیشنهاد شده است و از این رو بین خطای دائم و گذرا تمایز قائل می‌شود. در [۱۲] مشتق اول اندازه ولتاژ فاز خطا دیده برای تشخیص نوع خطا در خطوط انتقال فشارقوی به کار رفته است. روش معرفی شده در [۱۳] بر اساس اختلاف بین جریان محاسبه شده از طریق مدل خطای گذرا و جریان واقعی اندازه‌گیری شده در فاز خطای راکتور شنت است. این روش فقط در خطوط جبران‌سازی شده به وسیله راکتورهای موازی کاربرد دارد. روش دیگری برای ASPAR که در [۱۴] پیشنهاد شده است مبتنی بر رفتار اندازه ولتاژ فاز دچار خطا در نزدیک انتهای خط است. در [۱۵] یک استراتژی تجزیه و تحلیل سیگنال بر اساس الگوریتم PRONY برای دستیابی به مشخصات جریان راکتور شنت استفاده شده است. روش پیشنهادی در [۱۶] مبتنی بر آنتروپی انرژی بسته موجک است که در آن ویژگی‌های فرکانس زمانی ولتاژ فاز خطا دیده برای شناسایی قوس ثانویه و نوع خطا شناسایی می‌شود. در [۱۷]، نوع خطا بر اساس ولتاژ اندازه‌گیری شده محلی و با استفاده از یک طبقه‌بند مشخص بر پایه ماشین بردار پشتیبان، تعیین‌شده است. محققان در [۱۸] روشی را برای ASPAR در خطوط انتقال جبران‌شده با استفاده از تبدیل هیلبرت-هوانگ است. زمان تشخیص نسبتاً قابل توجه از معایب این روش می‌باشد. محققان در [۱۹] از فضای فاز (PS) سیگنال ولتاژ محلی برای تشخیص زمان خاموش شدن قوس ثانویه استفاده کرده‌اند. در [۲۰] یک روش با

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

استفاده از ADALINE[۷] برای استخراج هارمونیک‌های فاز خطا دیده و از یک شاخص جدید برای تشخیص نوع خطا و لحظه خاموش شدن قوس ثانویه استفاده کرده است. در [۲۱] از یک روش دو مرحله‌ای برای SPAR تطبیقی استفاده شده است که در مرحله اول، نوع خطا با استفاده از مشتق اولین هارمونیک ولتاژ فاز معیوب تعیین می‌شود. سپس در مرحله دوم، در صورت وقوع خطای گذرا، لحظه خاموش شدن قوس ثانویه تشخیص داده می‌شود. در [۲۲] بر اساس تکنیک حذف سیگنال به تأخیر افتاده (CDSC[۸]) و استفاده از ولتاژ محلی فاز خطا دیده راکتور موازی، نرخ متوسط اغتشاش (ADR[۹]) برای شناسایی ماهیت خطا محاسبه شده است. در [۲۳]، از اندازه مؤلفه DC در ولتاژ فاز بازشده برای تشخیص خاموشی قوس ثانویه استفاده می‌شود. در مرجع [۲۴] یک روش مبتنی بر PMU[۱۰] برای ASPAR پیشنهاد شده است. تشخیص نسبتاً طولانی لحظه خاموش‌شدن قوس از معایب این روش می‌باشد.

روش‌های مرور شده در بالا علی‌الرغم داشتن مزایای مناسب دارای معایب جدی از جمله نیاز به تعیین حد آستانه، کاربرد صرفاً در خطوط مجهز به راکتور، تأخیر در شناسایی زمان تشخیص وصل مجدد و نیاز به تجهیزات مخابراتی می‌باشند. در کنار موارد اشاره شده، روش‌های بررسی شده که عملکرد غالباً دارای بار محاسباتی قابل توجهی بوده که پیاده‌سازی عملی آنها را برای کاربردهای واقعی امروزی با مشکل روبرو می‌کند. از این رو در این مقاله برای غلبه بر مشکلات اشاره شده، یک ASPAR جدید مبتنی بر الگوریتم CUSUM[۱۱] پیشنهاد شده است. ASPAR پیشنهادی تنها با نمونه‌برداری از ولتاژ یک طرف خط انتقال:

- شناسایی نوع خطای تک‌فاز به زمین رخ داده (گذرا یا دائم)

و

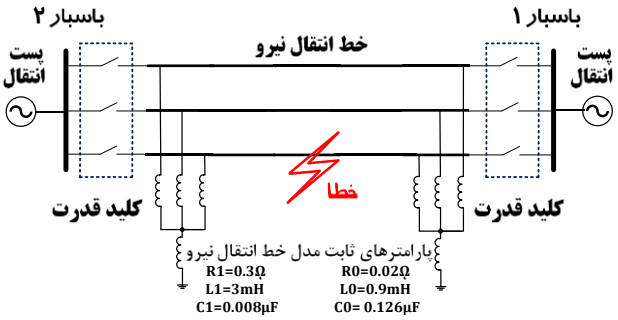
- تشخیص لحظه خاموش‌شدن کامل قوس ثانویه (لحظه وصل مجدد موفقیت‌آمیز فاز درگیر خطا)

را انجام می‌دهد. سرعت بسیار بالای روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌ها، عدم نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا، مقاوم بودن در برابر نویز و دقت بالا در کنار امکان پیاده‌سازی عملی بسیار ساده از مزایای فوق‌العاده ASPAR پیشنهادی می باشد.

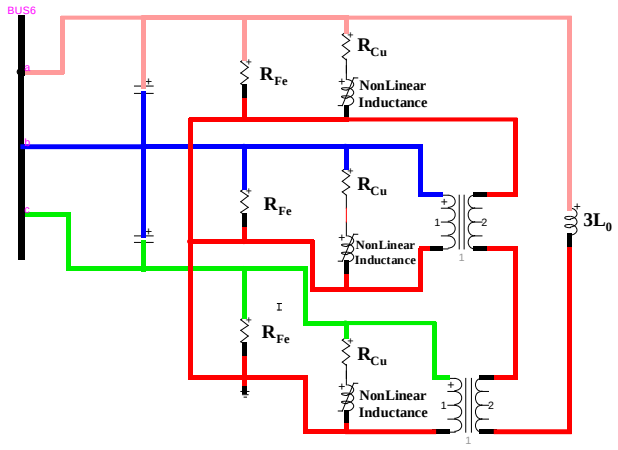
پیکربندی این مقاله بدین صورت میباشد که: در بخش ۲ خط انتقال فشارقوی مورد مطالعه معرفی می‌گردد. سپس در بخش ۳ طرح حفاظت پیشنهادی شرح داده می‌شود. در بخش ۴ به بررسی نتایج شبیه‌سازی و بحث بر روی آنها پرداخته می‌شود. در انتها نیز نتیجه‌گیری در بخش ۵ بیان می‌گردد.

۲- خط انتقال فشارقوی تحت مطالعه

خط انتقال فشارقوی تحت مطالعه، یک خط انتقال با سطح ولتاژ ۴۰۰ kV، ۲۴۰ km و ۵۰ Hz است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه انتقال تحت مطالعه مطابق شکل (۱) می‌باشد که اطلاعات مربوطه به خط انتقال نیز در این شکل مشخص است. مدلسازی و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV انجام شده است که دو پست ابتدا و انتهای خط انتقال هر کدام به‌صورت یک منبع ولتاژ در نظر گرفته شده است. به دلیل طولانی بودن خط انتقال در هر دو طرف خط از راکتور شنت استفاده شده است. شکل (۲) مدل راکتور شنت را نمایش می‌دهد که اطلاعات مربوط به آن در جدول (۱) ارائه‌شده است [۲۵].



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت تحت مطالعه



شکل (۲): مدل راکتور شنت

جدول (۱): اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل راکتور شنت [۲۵]

پارامتر	مقدار
R_{Fe}	3.04 kΩ
R_{Cu}	1.36 Ω
L_0	3.7 H
Capacitance of winding to ground	3.8 nF
Rated voltage	400 kV
Rated frequency	50 Hz
Reactive power	150 MVAr

۲-۱- مدل قوس الکتریکی

یکی از بخش‌های مهم در انجام شبیه‌سازی مطالعات بازبست خطوط انتقال فشارقوی، مدل‌سازی قوس خطا شامل قوس اولیه و قوس ثانویه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

است. در این مقاله برای مدل‌سازی قوس اولیه و قوس ثانویه، از مدل دینامیکی قوس مرجع [۲۶] که مبتنی بر رابطه (۱) است، استفاده‌شده است:

$$g = \int \left(\frac{1}{\tau}\right)(G - g)dt \qquad (۱)$$

که در آن g، G و τ به ترتیب کنداکتانس قوس متغیر با زمان، کنداکتانس قوس ثابت و ثابت زمانی است. کنداکتانس قوس ثابت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G = \frac{|i_{arc}|}{u_{st}} \qquad (۲)$$

$$u_{st} = (u'_0 + r'_0|i_{arc}|).l_{arc}(t) \qquad (۳)$$

که در آن u_{st} ولتاژ قوس ثابت، u'_0 مشخصه ولتاژ در طول قوس، r'_0 مؤلفه مقاومتی در طول قوس، i_{arc} جریان قوس و $l_{arc}(t)$ طول قوس می‌باشد. برای قوس اولیه τ و $l_{arc}(t)$ ثابت است درحالی‌که برای قوس ثانویه این مقادیر متغیر با زمان هستند.

ثابت زمانی قوس نسبت عکس با طول قوس دارد. وابستگی τ و $l_{arc}(t)$ را می‌توان توسط عبارت زیر تعریف کرد:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{l_{arc}}{l_0}\right)^a \qquad (۴)$$

که در آن τ_0 ثابت زمانی اولیه و a ضریبی با محدوده انتخابی از ۰/۱- تا ۰/۶- است.

برای پیاده‌سازی مدل قوس معرفی شده در این مقاله از نرم‌افزار EMTP-RV استفاده شده است. مقدار پارامترهای استفاده شده در مدل قوس بر اساس مرجع [۲۷] انتخاب شده است که در آن پارامترهای قوس ثانویه برای سطح ولتاژ ۴۰۰ kV به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$u'_0 = 0.9\frac{Kv}{m}\,,\tau_0 = 1ms\,,r'_0 = 22\frac{m\Omega}{m}\,,\quad a = -0.5$$

خاموش‌شدن قوس مبتنی بر مشتق زمانی مقاومت لحظه‌ای است که اگر از مقدار از پیش تعیین‌شده در واحد طول قوس فراتر برود قوس خاموش می‌شود. در عین حال میزان هدایت قوس نیز کمتر از مقدار از پیش تعیین‌شده دیگری در واحد طول قوس می‌شود:

$$g_{min} = 50(\mu s.m) \quad , \quad \frac{dr_{arc}}{dt} = 20(\frac{M\Omega}{S.m})$$

شکست دی‌الکتریک را می‌توان با اندازه‌گیری ولتاژ بازیابی قوس و مقایسه با ولتاژ مجدد آستانه و تنظیم مجدد میزان هدایت به مقدار پس از بازیابی مطابق رابطه (۵) شبیه‌سازی کرد.

$$E_s \cong \frac{T_s}{T_0}e^{\frac{t}{\tau}} \qquad (۵)$$

که در آن T_s دمای محیط، T_0 دمای کانال قوس و E_s قدرت میدان الکتریکی در دما T_s می‌باشد.

۳- طرح حفاظت پیشنهادی

عدم شناسایی به موقع زمان وصل مجدد در رله بازبست و تداوم حضور خطای گذرا در شبکه انتقال می‌تواند منجر به خسارت جبران‌ناپذیر اقتصادی و اجتماعی شود. از این‌رو به منظور افزایش سطح ایمنی، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت لازم است تا تمهیداتی در جهت شناسایی مطمئن و سریع زمان وصل مجدد صورت پذیرد [۲۸]. از همین روی در این مقاله یک طرح حفاظتی بسیار سریع مبتنی بر CUSUM به‌منظور افزایش پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

۳-۱- الگوریتم CUSUM

الگوریتم CUSUM روش بسیار مناسبی است که در بسیاری از زمینه‌ها برای آشکارسازی تغییرات ناگهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این الگوریتم معمولاً به منظور شناسایی سریع یک حالت گذرا (خطا) و یا شناسایی فازهای درگیر خطا در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود که در ادامه ابتدا نحوه عملکرد آن در کاربرد آشکارسازی خطا توضیح داده می‌شود. در این الگوریتم یک مقدار مرجع در نظر گرفته می‌شود که در واقع این مقدار، مرز میان حالت کار عادی شبکه و شرایط خطاست. برای این منظور از سیگنال جریان سیستم قدرت نمونه‌برداری کرده و دو پارامتر مطابق روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$S_k(1) = S_k \qquad (۶)$$

$$S_k(2) = -S_k \qquad (۷)$$

که در آن S_k نمونه برداشت‌شده در لحظه k اُم است. الگوریتم CUSUM به صورت روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شود:

$$g_k(1) = \mathrm{Max}(g_{k-1}(1) + S_k(1) - v) \qquad (۸)$$

$$g_k(2) = \mathrm{Max}(g_{k-1}(2) + S_k(2) - v) \qquad (۹)$$

در روابط فوق v پارامتر مرجع و g شاخص خروجی نتیجه تست است. برای شروع به کار الگوریتم، مقادیر اولیه مطابق مجموعه روابط (۱۰) انتخاب می‌شوند:

$$g_{k-1}(1) = 0 \quad g_{k-1}(2) = 0 \quad k = k_0 \qquad (۱۰)$$

حال به منظور افزایش اطمینان از عملکرد الگوریتم، اگر به ازای سه نمونه متوالی شرط رابطه (۱۱) برقرار شود، شرایط به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود:

$$g_k(1) > h \quad or \quad g_k(2) > h \qquad (۱۱)$$

که در آن h پارامتر حد آستانه است و در حالت ایده‌آل باید برابر صفر در نظر گرفته شود. انتخاب مناسب پارامتر v تأثیر بسزایی در عملکرد الگوریتم CUSUM دارد. زمانی که از الگوریتم CUSUM برای آشکارسازی خطا در سیستم قدرت استفاده می‌شود باید v را برابر ماکزیمم جریان تنظیمی رله انتخاب کرد [۲۹]. وجود عملگر Max در روابط (۸) و (۹) موجب می‌شود که خروجی g_k، صفر و یا یک مقدار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

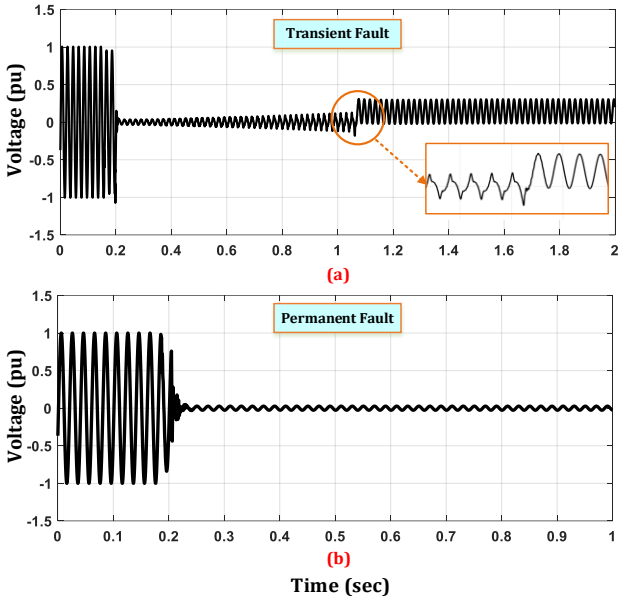
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

مثبت باشد. خروجی صفر بیانگر حالت کار نرمال سیستم و خروجی مثبت بیانگر عبور جریانی بزرگ‌تر از ماکزیمم جریان تنظیمی رله است. بنابراین می‌توان گفت مادامی‌که سیستم در حالت کار عادی است شاخص‌های g_k مقداری برابر صفر دارند. به محض اینکه خطایی در سیستم رخ دهد جریان سیستم بالا می‌رود، بنابراین مقادیر نمونه های گرفته‌شده از مرز v تجاوز می‌کنند. اگر خطا در نیم سیکل مثبت موج جریان رخ دهد ابتدا شاخص $g(1)$ و اگر خطا در نیم سیکل منفی رخ دهد شاخص $g(2)$ شروع به رشد می‌کند. مادامی‌که در نیم سیکل مثبت مقدار نمونه‌های S_k از V=1 بزرگ‌تر است، شاخص $g(1)$ روی روند رشد نگه‌داشته می‌شود. به محض ورود سیگنال به نیم سیکل منفی شاخص$g(2)$ شروع به رشد کردن می‌کند و این در حالی است که شاخص $g(1)$ هنوز مقداری مخالف صفر دارد. این نکته بیانگر ویژگی مثبت الگوریتم CUSUM است که حتی اگر دامنه سیگنال افت کند، شاخص‌ها به صورت ناگهانی صفر نمی‌شوند که این ویژگی موجب افزایش ثبات و قابلیت اطمینان این الگوریتم آشکارساز خطا می‌شود.

به عنوان مثال مرجع [۳] از الگوریتم CUSUM جهت شناسایی فاز درگیر خطا به منظور فعال‌سازی سریع واحد کاهش زمان مرده خط انتقال مجهز به جبران ساز استاتیکی استفاده کرده است. اما در این مقاله که هدف تشخیص لحظه وصل مجدد (لحظه خاموش‌شدن کامل قوس ثانویه) می‌باشد، ضروری است تغییراتی در الگوریتم CUSUM داده شود تا عملکرد آن برای کاربرد ASPAR پیشنهادی مناسب گردد. در حقیقت زمانی که یک خطای تک‌فاز به زمین رخ می‌دهد، رله خط انتقال (معمولاً رله دیستانس) خطا و فاز درگیر خطا را شناسایی نموده و فرمان قطع فاز معیوب را صادر می‌کند. لذا تا زمان قطع کامل فاز معیوب، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله (و یا هر مقاله دیگری) کارایی نخواهد داشت (در حقیقت نیاز به انجام هیچ عملی نمی‌باشد). بلکه پس از قطع کامل فاز معیوب است که می‌بایست لحظه خاموش شدن قوس ثانویه (در صورتی که خطا گذرا باشد) شناسایی و فرمان وصل مجدد سریعاً صادر شود.

به منظور درک بهتر مسأله ضروری است تا سیگنال ولتاژ فاز معیوب برای یک خطای تک‌فاز به زمین گذرا و دائم (خطاها بر روی شبکه شکل (۱) لحاظ گردیده) که در شکل (۳) نشان داده شده است مورد تجزیه و تحلیل مناسب قرار گیرد. شکل موج‌های ولتاژ شکل (۳) به صورت پریونیت شده می‌باشد. علت این کار نیز آن است که سطح ولتاژ شبکه تحت مطالعه در شکل موج پریونیت شده اهمیت نخواهد داشت و لذا برای سایر شبکه‌ها نیز قابل استفاده می‌باشد. لذا چنانچه روش پیشنهادی برای شبکه این مقاله کارساز باشد برای هر شبکه با سطح ولتاژ دیگری نیز بدون تنظیمات جدید قابل استفاده می‌باشد. به منظور سهولت، لحظه وقوع خطا و باز شدن کلیدهای فشارقوی در هر دو حالت خطای دائم و گذرا یکسان در نظر گرفته شده است که بر روی شکل (۳) به خوبی نشان داده شده است.

با دقت بر روی بخش پس از باز شدن کلیدهای فشارقوی فاز معیوب (لحظه ۲۰۰ msec) در شکل موج‌های شکل (۳)، مشخص است که در حالت خطای تک‌فاز به زمین دائم، شکل موج پدید آمده یک شکل موج سینوسی با دامنه بسیار کم می‌باشد. اما در حالت خطای تک‌فاز به زمین گذرا، شکل موج دارای یک روند سینوسی افزایشی می‌باشد. در لحظه ۱۰۷۲ msec که قوس ثانویه به طور کامل خاموش می‌شود، ریکاوری ولتاژ به وجود آمده و شکل موج یک مقدار DC نیز به خود می‌گیرد. دامنه شکل موج ولتاژ از لحظه بازشدن کامل کلیدهای قدرت تا لحظه خاموشی قوس ثانویه (یا در خطای دائم) کمتر از ۰/۱ پریونیت می‌باشد [۳۰] که در واقع این نکته، کلید حل مسأله می‌باشد.



شکل (۳): شکل موج‌های ولتاژ پریونیت شده مربوط به a) یک خطای تک‌فاز به زمین گذرا b) یک خطای تک‌فاز به زمین گذرا

در حقیقت چنانچه پارامتر v در روابط (۸) و (۹) برابر ۰/۱ انتخاب شود، رفتار شکل موج‌های شاخص‌هایCUSUM می‌تواند مرز بین خاموش‌شدن قوس ثانویه و قبل از آن را به سرعت شناسایی کند. بدین صورت که از لحظه بازشدن کلیدهای فشارقوی فاز معیوب تا لحظه خاموشی قوس ثانویه، مقدار شاخص‌های CUSUM برابر صفر می‌باشد. اما به محض خاموشی قوس ثانویه، شاخص‌ها شروع به افزایش قابل توجه از صفر خواهد نمود. لذا اگر برای سه سمپل متوالی مقدار شاخص CUSUM از صفر بیشتر شد به معنی خاموشی کامل قوس ثانویه می‌باشد. همچنین می‌توان این شرط اضافه را هم به الگوریتم حفاظتی اضافه نمود که اگر خطای به وجود آمده تا زمان حد پایداری خط انتقال فشارقوی (که برای هر خط مشخص و قابل بدست آوردن است) از بین نرفت (به عبارتی الگوریتم حفاظتی پیشنهادی فرمان وصل مجدد صادر نکرد)، به معنی وقوع خطای دائم (و یا خطای

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

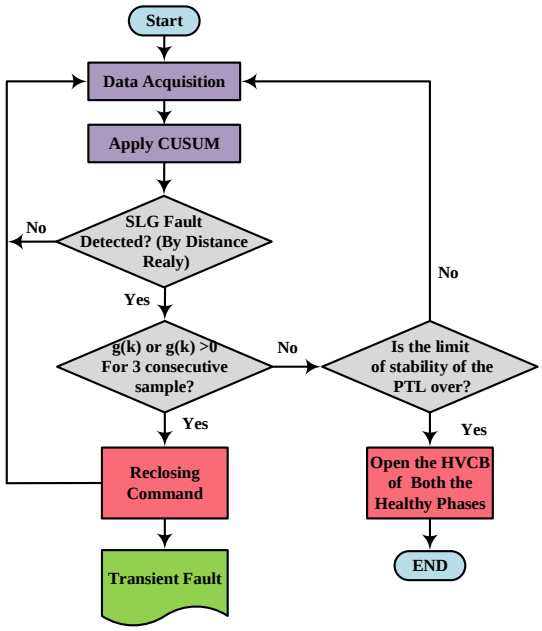
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

گذرای با زمان مرده بسیار طولانی و البته خطرناک برای سیستم قدرت) می‌باشد و ضروری است که هر دو فاز سالم باقیمانده نیز از مدار خارج گردند.

به طور خلاصه، در این مقاله از الگوریتم CUSUM به منظور:

- شناسایی نوع خطای تک‌فاز به زمین رخ داده (گذرا یا دائم) و
- تشخیص لحظه خاموش‌شدن نهایی قوس ثانویه (لحظه وصل مجدد موفقیت‌آمیز فاز درگیر خطا)

استفاده شده است. این مسأله یک کاربرد جدید برای الگوریتم CUSUM می‌باشد. شکل (۴) روندنمای طرح حفاظت پیشنهادی بسیار سریع در این مقاله به منظور افزایش پایداری سیستم‌های قدرت را نشان می‌دهد.



شکل (۴): روند نمای طرح حفاظتی پیشنهادی به‌منظور افزایش پایداری سیستم‌های قدرت

۴- نتایج شبیه‌سازی

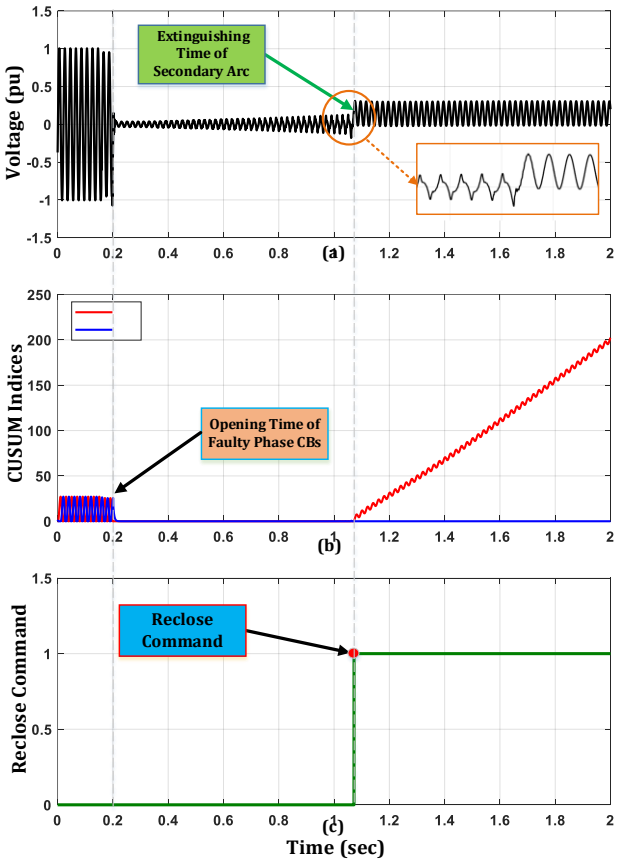
در این بخش از مقاله به منظور بررسی عملکرد دقیق الگوریتم حفاظت پیشنهادی، وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- خطای تک‌فاز به زمین گذرا

در این قسمت یک خطای تک‌فاز به زمین گذرا در وسط خط انتقال شکل (۱) ایجاد می‌گردد. با توجه به ولتاژ فاز معیوب در ابتدای خط انتقال در شکل (۵ الف)، مشخص است که خطا در لحظه msec ۱۵۶ رخ داده است و کلیدهای فشارقوی فاز معیوب را در لحظه msec ۲۰۰ از مدار خارج نموده‌اند. شکل (۵ ب) رفتار شاخص‌های CUSUM با تنظیمات پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که شاخص‌های CUSUM در این سناریو بسیار سریع متوجه زمان خاموشی قوس ثانویه شده به گونه‌ای که مطابق شکل (۵ ب) در لحظه msec ۱۰۷۴/۵، طرح پیشنهادی لحظه خاموش‌شدن قوس ثانویه را تشخیص می‌دهد. این در حالی است که قوس ثانویه در زمان msec ۱۰۷۲ به طور کامل خاموش شده است یعنی در کمتر از ربع سیکل قدرت. از همین رو طرح پیشنهادی مطابق شکل (۵ ج) فرمان وصل مجدد را در لحظه msec ۱۰۷۴/۵ صادر نموده است.

۴-۲- خطای تک‌فاز به زمین دائم

در این قسمت یک خطای تک‌فاز به زمین دائم در وسط خطا انتقال شکل (۱) ایجاد می‌گردد. با توجه به ولتاژ فاز معیوب در ابتدای خط انتقال در شکل (۶ الف)، مشخص است که خطا در لحظه msec ۱۸۵ رخ داده است و کلیدهای فشارقوی فاز معیوب را در لحظه msec ۲۰۰ از مدار خارج نموده‌اند. شکل (۶ ب) رفتار شاخص‌های CUSUM با تنظیمات پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که شاخص‌های مربوط به CUSUM در وضعیت صفر باقی مانده‌اند و لذا الگوریتم پیشنهادی مطابق شکل (۶ ج)، به درستی فرمان وصلی صادر ننموده است.



شکل (۵): شکل موج‌های مربوط به یک خطای گذرا a) ولتاژ پریونیت شده فاز معیوب b) شاخص‌های CUSUM c) فرمان وصل مجدد

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

۴-۳- ارزیابی آماری طرح حفاظت پیشنهادی در حالت‌های مختلف شبکه

در دو بخش قبل، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مواجهه با خطاهای تک‌فاز به زمین گذرا و دائمی ارزیابی گردید. در این قسمت، ارزیابی آماری طرح پیشنهادی در حالت‌های مختلف شبکه انجام می‌شود. برای بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی ۱۲۰۰ خطای مختلف شامل ۸۰۰ داده خطای تک‌فاز به زمین گذرا و ۴۰۰ داده خطای تک‌فاز به زمین دائمی از شبکه شکل (۱) با نرخ نمونه‌برداری ۱/۲ kHz استخراج می‌شوند. برای تولید داده‌های مورد نیاز، حالت‌های مختلف شبکه از جمله: امپدانس‌های مختلف خطا، مکان‌ها و فازهای مختلف خطا، ترانسپوزه بودن یا نبودن خط انتقال، مدل‌های مختلف قوس خطا، زوایای مختلف شروع خطا، ضریب توان‌های مختلف و حضور نویز با SNR از ۱۰ الی ۴۰ در نظر گرفته شده‌اند. جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت:

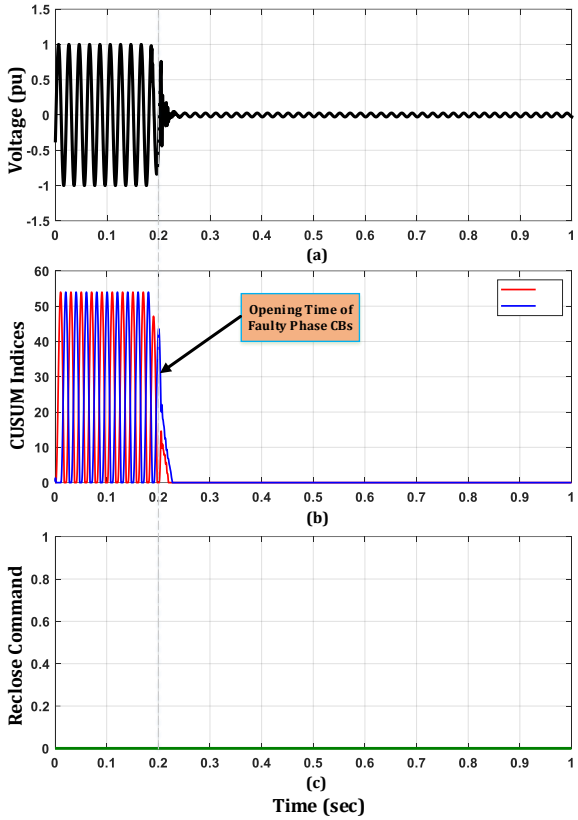
۱) روش پیشنهادی در ۷۹۳ مورد از ۸۰۰ خطاهای گذرا، لحظه خاموشی قوص ثانویه را به درستی شناسایی کرده است که نشان می‌دهد دقت روش پیشنهادی در شناسایی لحظه وصل مجدد برابر با ۹۹/۱۲٪ می‌باشد.

۲) روش پیشنهادی در ۳۹۵ مورد از ۴۰۰ از خطای دائمی به درستی فرمانی صادر ننموده است.

نتایج بدست آمده بیانگر موثر بودن عملکرد الگوریتم حفاظتی پیشنهادی می‌باشد.

۴-۴- مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر طرح‌ها

در جدول (۳) مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی و چندین روش ارائه شده در بخش (۱) مقاله آورده شده است. مطابق جدول (۳)، مرجع [۷] مبتنی بر بستر مخابراتی می‌باشد که ممکن است قابل استفاده در خطوط مختلف نباشد. روش‌های [۱۰]، [۲۲]، [۲۳] و [۱۱] تنها برای خطوط مجهز به راکتور شنت قابل استفاده می‌باشد. در روش [۶] و [۲۴] بررسی روش برای عملکرد در تمامی حالات خطوط ترانسپوزه‌شده/نشده مورد توجه محققان قرار نگرفته است. روش [۱۸] اگر چه حالت ترانسپوزه بودن خط انتقال را در نظر گرفته است، اما برای خطوط ترانسپوزه نشده اثر بخشی روش بررسی نگردیده است. روش ارائه شده در [۳] اگرچه عملکرد مناسبی در شناسایی نوع خطا و لحظه خاموش‌شدن قوس ثانویه دارد، اما بار محاسباتی آن متوسط بوده که پیاده‌سازی برخط آن با سخت‌افزارهای صنعتی موجود را دشوار می‌باشد. ASPAR پیشنهادی در [۲۱] اگرچه بار محاسباتی کمی دارد، اما مدت زمان لازم برای شناسایی لحظه خاموش‌شدن قوس ثانویه ۴ برابر روش پیشنهادی است. علاوه بر موارد اشاره شده، با مشاهده جدول (۳) می‌بایست اشاره کرد که سریع‌ترین روش جهت شناسایی لحظه خاموشی قوس ثانویه مربوط به روش پیشنهادی در این مقاله می‌باشد.



شکل (۶): شکل موج‌های مربوط به یک خطای دائم a) ولتاژ پریونیت شده فاز معیوب b) شاخص‌های CUSUM c) فرمان وصل مجدد

مضاف بر آن بار محاسباتی روش پیشنهادی با توجه به ساختار بسیار ساده CUSUM، بسیار کم بوده که این مسأله پیاده‌سازی عملی آن را بسیار ساده می‌کند. به طور خلاصه مزایای طرح پیشنهادی عبارتند از:

- سرعت بسیار بالای روش پیشنهادی و در نتیجه عملکرد بدون وقفه به دلیل شناسایی دقیق زمان خاموش‌شدن قوس ثانویه،
- پیاده‌سازی عملی بسیار ساده،
- عدم وابستگی به مقدار آستانه،
- عدم نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا،
- عدم تأثیر نویز بر عملکرد طرح پیشنهادی و
- عملکرد صحیح در پیکره‌بندی‌های مختلف شبکه.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم حفاظتی جدید جهت بازبست سریع و مطمئن در خطوط انتقال فشارقوی ارائه گردید. روش پیشنهادی که مبتنی بر روش CUSUM می‌باشد، با نمونه‌برداری از ولتاژ خط انتقال، لحظه وصل مجدد موفقیت‌آمیز را شناسایی می‌نماید. نتایج بررسی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

الگوریتم پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی شبکه نمونه ۴۰۰ kV در نرم‌افزار EMTP-RV و در شرایط مختلف شامل انواع امپدانس‌های مختلف خطا، مکان‌ها و فازهای مختلف خطا، ترانسپوزه بودن یا نبودن خط انتقال، مدل‌های مختلف قوس خطا، زوایای مختلف شروع خطا، ضریب توان‌های مختلف و حضور نویز با SNR از ۱۰ الی ۴۰ نشان‌دهنده توانایی طرح حفاظت پیشنهادی در تشخیص لحظه خاموشی قوس ثانویه می‌باشد. سرعت بسیار بالای روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های پیشنهاد شده، عدم نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا، دقت بالا در تشخیص زمان وصل مجدد موفقیت‌آمیز در کنار امکان پیاده‌سازی عملی بسیار ساده، روش پیشنهادی را برای کاربردهای عملی بسیار مناسب می‌داند.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی

نوع خطای SLG	وضعیت شبکه	تعداد خطاها	درصد صحیح عمل نکردن در خطای تک‌فاز به زمین دائم	درصد تشخیص صحیح زمان خاموش شدن قوس ثانویه
گذرا	امپدانس‌های مختلف خطا	۲۵۰	–	٪ ۹۹/۲۰
	فازها و مکان‌های مختل خطا	۱۵۰	–	٪ ۹۸/۶۶
	مدل‌های مختلف قوس خطا	۱۰۰	–	٪ ۹۹
	ضریب توان‌های مختلف	۱۰۰	–	٪ ۱۰۰
	زاویه شروع خطاهای مختلف	۱۲۰	–	٪ ۱۰۰
	قرارگیری در معرض نویز، SNR=10	۴۰	–	٪ ۹۷/۵
	قرارگیری در معرض نویز، SNR=40	۴۰	–	٪ ۹۷/۵
دائم	امپدانس‌های مختلف خطا	۱۰۰	٪ ۱۰۰	–
	فازها و مکان‌های مختل خطا	۱۰۰	٪ ۹۹	–
	مدل‌های مختلف قوس خطا	۵۰	٪ ۹۸	–
	ضریب توان‌های مختلف	۵۰	٪ ۱۰۰	–
	زاویه شروع خطاهای مختلف	۶۰	٪ ۹۶/۶۶	–
	قرارگیری در معرض نویز، SNR=10	۲۰	٪ ۹۵	–
	قرارگیری در معرض نویز، SNR=40	۲۰	٪ ۱۰۰	–

جدول (۳): مقایسه طرح حفاظت پیشنهادی و سایر طرح‌ها

مرجع	فرکانس نمونه‌برداری (kHz)	وابستگی به سطح آستانه	وابستگی به بستر مخابراتی	وابستگی به راکتور جبران ساز	بار محاسباتی	بررسی خطوط ترانسپوز شده/نشده	زمان مورد نیاز برای شناسایی لحظه خاموش شدن قوس (msec)
[7]	۴	✓	✓	×	NR	شده	NR
[10]	NR	✓	×	✓	کم	نشده	NR
[22]	NR	✓	×	✓	کم	نشده	۲۰
[23]	۱/۶	✓	×	✓	کم	نشده	NR
[11]	۱/۶	×	×	✓	متوسط	نشده	۳۰
[6]	۱/۶	×	×	×	متوسط	نشده	NR
[24]	NR	✓	×	×	کم	نشده	۱۲۰
[18]	۱/۹۲	✓	×	×	کم	شده	۳۲
[3]	۱/۲	×	×	×	متوسط	شده/نشده	۲۰
[21]	۵	×	×	×	کم	شده/نشده	۱۰
روش پیشنهادی	۱/۲	×	×	×	بسیار کم	شده/نشده	۲/۵

NR: Not reported

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

مراجع

[1] Azizpour H R, Jannati M, Ansari M R. A Hybrid Method Based on The Simultaneous Use of Nanocrystalline Rings and XLPE Cables to Reduce Very Fast Transient Overvoltages in High Voltage Gas Insulation Substations. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (2) :171-181

[2] Hatami Aloghareh, Farhad. Jannati, Mohsen. and Shams, Mohammadreza. "A deep long Short-Term memory based scheme for Auto-Reclosing of power transmission lines" Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 141, 108105, 2022.

[3] Aliyari, Mojtaba. Jannati, Mohsen. Dolatshahi, Milad. and Rezaei, Mohammad Mahdi. "A four-step protection strategy to improve stability of high voltage transmission lines" Electr. Power Syst. Res, vol. 208, 107922, 2022.

[4] Jamali S, Parham A., New approach to adaptive single pole autoreclosing of power transmission lines, IET Gener. Transm. Distrib, 4(1), 115-122, 2010.

[5] Aggarval RK, Johns AT, Dunn RW, Fitton DS., Neural network based adaptive single-pole autoreclosure technique for EHV transmission system, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution.141(2), 155-160, 1994.

[6] Kawady T.A, Elkalashy N.I, Ibrahim A.E, Taalab A. M.I., Arcing fault identification using combined Gabor transform-neural network for transmission lines, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 61, 248–258, 2014.

[7] Gajare S, Pradhan A.K., Synchrophasor-based intelligent autoreclosing scheme for series compensated transmission lines, IEEE Trans. Power Deliv. 32, 2255–2262, 2017.

[8] Quoc TT, Hadj-Said N, Sabonnadiere JC, Feuillet R., Reducing dead time for single-phase auto-reclosing on a series-capacitor compensated transmission line, IEEE Trans. Power Deliv, 15(1), 51-56, 2000.

[9] Jiaxing N, He B, Wang Z, Kong J., Algorithm for adaptive single-phase reclosure on shunt-reactor compensated extra high voltage transmission lines considering beat frequency oscillation, IET Gener. Transm. Distrib. 12(13), 3193-31200, 2018.

[10] Luo X, Huang C, Jiang Y, Guo S., An adaptive three-phase reclosure scheme for shunt reactor-compensated transmission lines based on the change of current spectrum, Electr. Power Syst. Res.158, 184-194, 2018.

[11] Nikoofekr I, Sadeh J., Determining secondary arc extinction time for single-pole auto-reclosing based on harmonic signatures, Electr. Power Syst. Res. 163, 211–225, 2018.

[12] Zhalefar F, Dadash M.R, Sidhu T.S., A high-speed adaptive single-phase reclosing technique based on local voltage phasors, IEEE Trans. Power Deliv. 32 (3) 1203–1211, 2017.

[13] Suonan JL, Sun DD, Fu W, Wang XB, Liu WT, Jiao ZB., Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors, Proc CSEE. 26(6), 75-81, 2006.

[14] Jamali S, Baayeh A.G., Detection of secondary arc extinction for adaptive single phase auto-reclosing based on local voltage behavior, IET Gener. Transm. Distrib. 11(4) 952–958, 2017.

[15] Chothani N.G, Bhalja B.R, Desai A.K., A new algorithm for coordination of relay and auto-reclosure in 220 kV transmission system, India Conference (INDICON), 1–6, 2013.

[16] Haitao Z, Chen Ping, Li-Ping W., Adaptive reclosure technology for high-voltage overhead lines combined with underground power cables based on travelling wave principle. Proceedings of the ICCEAE, Springer.143–150, 2012.

[17] Morales J, Muñoz E, Orduña E, Idarraga-Ospina G., A Novel Approach to Arcing Faults Characterization Using Multivariable Analysis and Support Vector Machine, Published: 3 June 2019.

[18] Ghaderi Baayeh A, Bayati N., Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform, Energies, 13(20), 1-15, 2020.

[19] Khodabakhshi F, Sarlak M., A noncommunication adaptive single phase auto-reclosure of transmission lines using phase space based criteria, Int. J. Electr. Power Energy Syst, 98, 537-549, 2018.

[20] Jannati M, Moshtagh J., Hardware implementation of a real-time adaptive single-phase auto-reclosure for power transmission lines, International Transactions on Electrical Energy Systems, 30(5), 2020.

[21] Jannati M, Nazari M.Y., Improving the stability of power transmission lines based on an adaptive single pole autoreclosure using a two-step strategy, IET Gener. Transm. Distrib, 14(1), 2020.

[22] Xing Xie, Chun Huang., A novel adaptive auto-reclosing scheme for transmission lines with shunt reactors, Electr. Power Syst. Res, 171, 47–53, 2019.

[23] Ahmed RA, El Sehiemy RA, Abdelaziz AY., An optimal/adaptive reclosing technique for transient stability enhancement under single pole tripping, Electr. Power Syst. Res, 151, 348-358, 2017.

[24] Monadia M, Hooshyarb H, Vanfretti L., Design and real-time implementation of a PMU-based adaptive autoreclosing scheme for distribution networks, INT J Elec Power, 105, 37–45, 2019.

[25] Župan, Alan, Božidar Filipović-Grčić, and Dalibor Filipović-Grčić. "Transients caused by switching of 420 kV three-phase variable shunt reactor", Electr. Power Syst. Res, 138 (2016): 50-57.

[26] Kizilcay, M., and T. Pniok. "Digital simulation of fault arcs in power systems" European Transactions on Electrical Power 1, no. 1 (1991): 55-60.

[27] Prikler, László, Mustafa Kizilcay, Gábor Bán, and Péter Handl. "Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records." In 14th PSCC, pp. 1-6. 2002.

[28] Khalilifar M, Shahrtash S M, Abdi H, Adinehpour F, Ghandehari N. A novel method for detecting pole discordance of transmission line circuit breaker. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2021; 18 (2) :59-66

[29] Mohanty S.R, Pradhan A.K, Routray A., A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application, IEEE Trans. Power Deliv, 23(1), 79-86, 2007.

[30] M. Jannati, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, and S. M. Ahadi, "A novel approach to adaptive 28 phase auto-reclosing scheme for EHV transmission lines." Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 33, no. 3, pp. 639_646, Mar. 2011

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]

زیرنویس‌ها

[1] Single-Phase Auto-Reclosing
[2] Adaptive Single-Phase Auto-Reclosing
[3] Discrete Fourier Transform
[4] Total Harmonic Distortion
[5] Artificial Neural Network
[6] Gabor Transform
[7] Adaptive Linear Neuron
[8] Cascaded Delayed Signal Cancellation
[9] Average Distortion Rate
[10] Phasor Measurement Unit
[11] Cumulative Sum

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.156]