Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Adaptive Single-phase Auto-reclosing Method based on Estimating the Overvoltage at the Time of Reclosing and Fault Location Insulation Conditions

Farid Kamel [a], **Mohammad Mirzaie** [a], **Majid Shahabi** [a,*], **Nabiollah Ramezani** [b]

[a] *Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran*
[b] *Electrical and Computer Engineering Faculty, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
Adaptive Single-phase reclosing;
Detection of secondary arc extinction;
Over voltage;
Reignition voltage;
Secondary arc

ABSTRACT

Following occurrence of transient single-phase fault on transmission line, a primary arc is typically initiated. For fault clearing, the protection system temporarily disconnects the affected phase. After this operation, the primary arc is extinguished; but, due to the electric field surrounding the healthy phases and capacitance between the conductors, a large voltage is induced on the opened phase. So, due to the weakness of the insulation properties at the fault location, this voltage can lead to a reestablishing the arc at fault location, known as secondary arc. A secondary arc continues until the insulation properties of the air around the fault return to normal, so the reclosing operation will fail if it is reconnected prior to the secondary arc being extinguished. Therefore, in recent years, some studies have been conducted on identifying the secondary arc extinction time and the proper procedure for reclosing. This article aims to evaluate the insulation conditions at the fault location after the secondary arc has been extinguished to determine the appropriate time for reclosing. For this purpose, it is necessary to estimate the maximum voltage at the moment of closing immediately following the extinction of the secondary arc. Following this, the reignition voltage at the fault location is continuously calculated and by comparing its magnitude with the maximum voltage estimated from the moment of closing, a reclosing command is issued. In order to conduct this study, a 400kV line is simulated under different fault conditions and the proposed method is implemented, analyzed, verified, and evaluated.

© 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/)

UNCORRECTED PROOF

*** Corresponding author.**
E-mail address: Shahabi.m@nit.ac.ir

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

بازبست تک‌فاز تطبیقی بر اساس برآورد اضافه ولتاژ لحظه‌ی وصل و شرایط عایقی محل خطا

فرید کامل[۱]، محمد میرزائی[۱]، مجید شهابی[۱،*] و نبی‌اللّه رمضانی[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:
بازنگری مقاله:
پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:
قوس ثانویه،
بازبست تطبیقی تکفاز،
ولتاژ ایجاد قوس مجدد،
اضافه ولتاژ،
تشخیص خاموشی قوس ثانویه

چکیده

در خطوط انتقال، پس از وقوع خطای تک‌فاز گذرا و برقراری قوس اولیه در محل خطا، به جهت رفع عامل خطا، باز شدن موقت فاز معیوب توسط سیستم حفاظت فراهم می‌گردد. پس از انجام این عملیات، قوس اولیه خاموش شده ولیکن به دلیل وجود میدان الکتریکی در اطراف فازهای سالم و همچنین ظرفیت خازنی بین هادی‌های خط، ولتاژ زیادی روی فاز باز شده القاء می‌شود. در آن‌صورت و به دلیل ضعف عایقی در محل خطا، این ولتاژ می‌تواند باعث وقوع قوس مجدد معروف به قوس ثانویه در محل خطا گردد. قوس ثانویه تا زمان برگشت خاصیت عایقی هوای اطراف محل خطا به شرایط عادی، ادامه داشته بطوریکه در صورت وصل مجدد و قبل از خاموشی آن، عملیات بازبست با شکست مواجه می‌گردد. بدین‌منظور در سالیان اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه‌ی شناسایی زمان خاموشی قوس ثانویه و عملکرد صحیح عملیات بازبست انجام شده است. در این مقاله، شرایط عایقی محل خطا پس از خاموشی قوس ثانویه، به جهت تعیین زمان وصل مجدد فاز معیوب ارزیابی می‌گردد. برای نیل به این هدف، حداکثر ولتاژ لحظه‌ی وصل مجدد، بلافاصله پس از اطمینان از خاموشی قوس ثانویه، برآورد و تعیین می‌گردد. سپس به طور مداوم، ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد در محل خطا، محاسبه شده و با مقایسه اندازه آن با حداکثر ولتاژ برآورد شده از لحظه‌ی وصل، فرمان وصل مجدد صادر می‌گردد. جهت انجام این مطالعه، یک خط نمونه ۴۰۰ کیلوولت تحت شرایط مختلف خطا شبیه‌سازی شده و ضمن پیاده سازی روش پیشنهادی، نتایج تحلیل و مورد صحت‌سنجی و ارزیابی قرار می‌گیرند.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495

© 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/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه[۱]

خطوط هوایی انتقال نیرو به دلیل طولانی بودن و عبور از مناطق گوناگون، همواره در معرض تهدیدات غیرمنتظره قرار دارند. درصورت وقوع خطا، ممکن است خط از شبکه خارج شود. خروج خطوط هوایی می‌تواند ناشی از عواملی همچون وزش باد، برخورد صاعقه، انباشت یخ بر روی هادی‌ها و یا آلودگی و شکست مقره‌ها باشد. آمارها نشان می‌دهند که حدود ۸۰ درصد خطاهای رخ داده بر روی خطوط هوایی، از نوع تک‌فاز گذرا هستند [۱]. برخورد صاعقه به هادی‌های خطوط انتقال می‌تواند موجب اضافه ولتاژ موقت شده و منجر به یونیزاسیون هوای اطراف هادی یا زنجیره مقره شود. یونیزه شدن هوای بین هادی فاز و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Shahabi.m@nit.ac.ir
۱. دانشکده مهندسی برق‌و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۲.دانشکده مهندسی برق‌و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

زمین باعث وقوع قوس الکتریکی با طول بلند در اطراف زنجیره مقره شده که بدان قوس اولیه اطلاق می‌شود. از طرفی بعد از رفع عامل وقوع خطا، برق‌دار بودن فاز معیوب باعث تداوم خطای گذرا خواهد شد. لذا به منظور رفع این مسئله، فاز معیوب بطور موقت توسط سیستم حفاظتی باز شده تا قوس اولیه خاموش گردد. لیکن به علت وجود میدان الکتریکی در اطراف فازهای سالم و همچنین ظرفیت خازنی بین هادی‌ها، ولتاژ زیادی روی فاز باز شده، القا می‌شود. حال، اگر هوای اطراف محل خطا، به دلیل یونیزه شدن ناشی از قوس اولیه، مقاومت عایقی کافی نداشته باشد، وقوع قوس الکتریکی مجدد معروف به قوس ثانویه محتمل خواهد بود. اما به علت صفر شدن متوالی جریان قوس و از طرفی افزایش طول قوس ثانویه ناشی از وزش باد، هوای اطراف محل خطا دیونیزه شده و ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد در محل خطا، افزایش خواهد یافت. تداوم قوس ثانویه، تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار این ولتاژ از ولتاژ دو سر قوس فراتر رود [۲]. در این خصوص، در روش مرسوم بازبست خطوط انتقال، پس از وقوع خطای تک‌فاز گذرا، فاز معیوب برای مدت زمان معین قطع گردیده تا فرصت کافی جهت خاموشی قوس ثانویه مهیا گردد که بدان بازبست تأخیری اطلاق می‌شود [۳]. در بازبست با زمان مشخص، اگر خطا دائمی باشد یا قوس ثانویه خاموش نشده باشد،عملیات وصل مجدد موفق نخواهد بود. لذا شرط وصل مجدد فاز معیوب، همانا اطمینان از رفع خطا یا خاموشی قوس ثانویه می‌باشد. با توجه به اهمیت این موضوع، در سالیان اخیر مطالعات مختلفی در زمینه بازبست خودکار تکفاز تطبیقی انجام شده است. در [۴]، از نسبت هارمونیک فرد به زوج شکل موج ولتاژ فاز معیوب به منظور تشخیص خاموشی قوس ثانویه استفاده شده است. در [۵]، زمان خاموشی قوس ثانویه بر حسب هارمونیک‌های فرد حاصله از تبدیل موجک شکل موج ولتاژ فاز باز شده، تعیین گردیده است. از طرفی در خطوط مجهز به راکتور، با توجه به وجود هارمونیک‌های فرد در شکل موج ولتاژ فاز معیوب، در قبل و پس از خاموشی قوس، تعیین زمان خاموشی قوس ثانویه با مقایسه این هارمونیک‌ها میسّر نمی‌باشد. لذا، در [۶]، از دامنه هارمونیک‌های فرد مرتبط با فازهای سالم، به عنوان شاخصی جهت تشخیص زمان خاموشی قوس ثانویه استفاده شده است. در [۷]، زمان خاموشی قوس ثانویه، با مقایسه سیگنال‌های ارسالی و دریافتی توسط سیستم انتقال اطلاعات خطوط (PLC[2])، در پست‌های طرفین خط، تشخیص داده شده است. در این روش، سیگنال‌هایی با دامنه واحد به طور پیوسته از هر طرف به طرف دیگر خط ارسال می‌گردد. در این مرجع نشان داده شده است که مقاومت قوس ثانویه با فرکانسی معادل دو برابر فرکانس قدرت در حال نوسان است. لذا در صورت تداوم خطای گذرا، سیگنال‌های دریافتی، پیوسته نبوده و با فرکانسی نزدیک به فرکانس قوس نوسان می‌کند. لیکن پس از خاموشی قوس ثانویه، سیگنال دریافتی، پیوسته و با دامنه واحد خواهد بود. در [۸]، خاموشی قوس ثانویه با استفاده از تبدیل موجک شکل موج ولتاژ فاز معیوب تشخیص داده می‌شود. در [۹]، از تغییرات مؤلفه DC ولتاژ توالی صفر، جهت تفکیک خطای گذرا از دائمی استفاده شده و در ادامه، تشخیص خاموشی قوس ثانویه، با مقایسه دامنه هارمونیک سوم مؤلفه صفر ولتاژ فاز معیوب و مقدار تجمعی آن انجام می‌گردد. همچنین در [۱۰]، از یک فیلتر تطبیقی دیجیتال برای پردازش سیگنال‌های ولتاژ استفاده می‌شود. بر اساس این تحقیق، کاهش دومرحله‌ای دامنه ولتاژ فاز معیوب، پس از وقوع خطای تک‌فاز و سپس افزایش آن در یک مرحله پس از باز شدن این فاز، نشان از خاموشی قوس ثانویه بوده و در غیر این صورت، خطا دائمی محسوب می‌شود. در [۱۱]، با باز شدن فاز معیوب، سیگنال ولتاژ توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU[3]) طرفین خط، به واحدهای آشکارسازی خطا ارسال می‌شود. سپس با استفاده از این اطلاعات، هارمونیک‌های ولتاژ در نقطه خطا و همچنین ضریب اعوجاج هارمونیکی کل (THD[4]) استخراج می‌شود. اگر ضریب اعوجاج هارمونیکی کل از مقدار آستانه‌ای بیشتر شود خطا از نوع گذرا بوده و در غیر اینصورت از نوع دائمی به شمار می‌رود. در [۱۲]، پس از باز شدن فاز معیوب، اختلاف ولتاژ نقطه خطا و همچنین زاویه آن با میانگین ولتاژ دوفاز سالم، با مقادیر قبلی خود مقایسه و اگر این مقادیر تا پایان زمان تعیین شده، درحدود صفر باشد، خطا از نوع دائم است. لیکن، در صورتیکه این مقادیر برای

[2] Power line Carrier
[3] Phasor measurement unit
[4] Total harmonic distortion

UNCORRECTED PROOF

لحظاتی دارای مقدار مثبت بوده و سپس به صفر میل کند، نشانه خاموشی قوس ثانویه خواهد بود. در [۱۳]، با بهره‌گیری از تحلیل چندمتغیره و به‌کارگیری تکنیک‌های کاهش بعد داده‌ها، سیگنال‌های خطا مورد پردازش و بررسی قرار می‌گیرند. پس از این مرحله، با استفاده از یک ماشین بردار پشتیبان (SVM[5])، خطاهای به‌دست‌آمده به دو دسته‌ی اصلی شامل خطاهای گذرا و خطاهای دائمی طبقه‌بندی می‌شوند. در [۱۴]، تشخیص خاموشی قوس ثانویه با استفاده از تحلیل مستقیم فازورهای ولتاژ هر فاز در حوزه مُدال[6] انجام می‌شود. سپس با بررسی رفتار دامنه و ناپایداری‌های فازور، زمان خاموشی قوس را شناسایی می‌کند. در [۱۵]، با استفاده از روش تخمین حداقل مربعات، پارامترهای مربوط به ولتاژ مربوط به فاز معیوب برآورد شده و از داده های حاصل از این تخمین به روش ماشین بردار پشتیبان زمان خاموشی قوس ثانویه تعیین می‌شود. در [۱۶]، از اختلاف بین مقادیر مؤلفه توالی صفر توان اکتیو طرفین خط، به عنوان شاخصی برای تعیین زمان خاموشی قوس ثانویه استفاده شده است. همچنین در [۱۷]، از اختلاف مقادیر مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی توان ظاهری خط، جهت تشخیص خطای گذرا و دائم استفاده می‌گردد. این شاخص در حالت عادی بزرگتر از صفر بوده و در حالت خطای دائمی، به دلیل یکسان بودن مؤلفه های توالی مثبت و منفی توان ظاهری، نزدیک به صفر می‌باشد. همچنین در صورت گذرا بودن خطا، این شاخص در ابتدا بزرگتر از صفر بوده و بعد از باز شدن فاز معیوب و در مدت زمان کوتاه، صفر می‌شود. سپس این شاخص در مدت زمان کمتر از یک چهارم سیکل، به مقدار قبلی خود نزدیک و در صورت خاموشی قوس ثانویه، به مقدار اولیه خود باز می‌گردد. در [۱۸]، از تبدیل مودال ولتاژ فازهای سالم و معیوب با استفاده از ماتریس کارنبوئر[7]، معیاری جهت تشخیص خاموشی قوس ثانویه برای خطوط مجهز به راکتور جبرانساز ارائه شده است. در [۱۹]، خط انتقال به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌شود. پس از باز شدن فاز معیوب، کلید این فاز به طور موقت از طرفی که به ناحیه خطا دورتر است وصل می‌شود. سپس جریان فاز معیوب در طرفی که وصل شده اندازه‌گیری می‌شود. مقدار این جریان به عنوان شاخصی جهت تشخیص خاموشی قوس ثانویه استفاده می‌شود. در [۲۰]، مقدار مؤثر ولتاژ فاز معیوب در هر لحظه از زمان با مقدار لحظه‌ی قبل خود مقایسه گردیده بطوریکه افزایش قابل توجه این اختلاف، نشان دهنده خاموشی قوس ثانویه می‌باشد.

با توجه به موارد فوق و مطالعات انجام شده در زمینه بازبست تطبیقی تکفاز، فرمان وصل مجدد مناسب می‌بایست بلافاصله پس از اطمینان از خاموشی قوس ثانویه صورت گیرد. شرط خاموشی قوس ثانویه، این است که ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد، از مقدار ولتاژ القایی فاز باز شده، فراتر رود. لیکن با وجود خاموشی قوس ثانویه، این احتمال وجود دارد که ولتاژ گذرای ناشی از وصل مجدد، از مقدار ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس ثانویه، فراتر رفته و سبب برقراری قوس مجدد شود. در صورت ایجاد قوس ثانویه مجدد پس از وصل مجدد، عملیات بازبست با موفقیت همراه نبوده ولذا این مقاله در صدد تعیین زمان وصل مجدد فاز بازشده، پس از اطمینان از خاموشی قوس ثانویه در شرایط وقوع خطای گذرا و یا اطمینان از باز شدن خط بدون وجود خطا، براساس حداکثر اضافه ولتاژ برآورد شده‌ی لحظه‌ی وصل مجدد می‌باشد.

بنابراین در ابتدا، با استفاده از روش بررسی ولتاژ مؤثر، از خاموشی قوس ثانویه و یا عدم وجود خطا پس از باز شدن یک‌فاز اطمینان حاصل شده و بلافاصله پس از آن حسب مطالعات حالت گذرا، حداکثر مقدار اضافه ولتاژ لحظه‌ی وصل مجدد تخمین زده می‌شود. درصورتی‌که این ولتاژ از سطح ولتاژ قابل تحمل کلیدزنی تجهیزات شبکه (SIWL[8])، بیشتر باشد، فرمان باز شدن خط صادر و در غیر این صورت، به‌طور مداوم با ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد در محل خطا، مقایسه می‌گردد. در ادامه، هرگاه ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد از حداکثر ولتاژ برآورد شده‌ی لحظه وصل مجدد فراتر رود، فرمان وصل فاز معیوب صادر می‌گردد. در غیر این صورت و پس از پایان مدت مجاز دوفاز بودن خط، فرمان باز شدن هر سه‌فاز صادر می‌گردد.

با توجه به توضیحات فوق، در قسمت دوم مقاله، با فرض عدم وجود خطا، ولتاژ القایی فاز باز شده، به‌عنوان آستانه خاموشی قوس ثانویه تعیین می‌گردد. در قسمت سوم، روش

[5] Support Vector Machine
[6] Modal domain
[7] Karrenbauer matrix
[8] Switching impulse withstand level

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

UNCORRECTED PROOF

تشخیص عدم وجود خطا و یا خاموشی قوس ثانویه ارائه شده است. در قسمت چهارم، تخمین دامنه اضافه ولتاژ فاز باز شده در زمان وصل مجدد ارائه می‌شود. در نهایت الگوریتم روش پیشنهادی این تحقیق در قسمت پنجم و نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها در قسمت ششم ارائه می‌گردد. همچنین ارزیابی روش پیشنهادی، مقایسه روش ارائه شده با سایر مطالعات انجام شده و در نهایت نتیجه‌گیری در قسمت‌های بعدی بیان شده است.

۲-محاسبه ولتاژ القایی فاز باز شده در شرایط بدون خطا

در این قسمت، فرض می‌شود که یکی از فازها بدون خطا و از دو سمت باز شده و دو فاز مجاور برق‌دار هستند. در آن صورت ولتاژ القایی آن فاز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شایان ذکر است ولتاژ القایی روی فاز باز شده در شرایط بدون خطا، همواره بالاتر از ولتاژی است که در شرایط وقوع خطای گذرا یا دائم روی این فاز القا می‌شود. بنابراین، این ولتاژ می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تشخیص شرایط بدون خطا در نظر گرفته شود. در این راستا، ولتاژ القایی فاز باز شده در شرایط بدون وقوع خطا و در دو حالت با و بدون وجود راکتور جبران‌ساز در خط بررسی می‌شود.

۲-۱-بدون وجود راکتور جبران‌ساز در خط

در این قسمت، با فرض اینکه خط انتقال بدون راکتور باشد، مقدار ولتاژ القایی مؤثر فاز باز شده (V_y) بر حسب پارامترهای ثابت خط، مطابق با رابطه (۱) می‌باشد. این مقدار تقریباً در تمام طول هادی فاز باز شده برابر می‌باشد [۲۱].

$$V_y = \frac{C_1 - C_0}{2C_1 - C_0} E_a \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، E_a ولتاژ مؤثر در سمت منبع فاز باز شده و C_0 و C_1 نیز به ترتیب ظرفیت‌های خازنی مؤلفه‌های توالی صفر و مثبت خط می‌باشد.

۲-۲-با وجود راکتور جبران‌ساز در خط

حال اگر یک راکتور جبران‌ساز با خاصیت القایی L_P در یک طرف خط انتقال قرار گیرد، مقدار ولتاژ القائی مؤثر فاز باز شده (V_{yr}) با استفاده از رابطه (۲) به‌دست می‌آید [۲۲].

$$V_{yr} = \left(\frac{3}{1 + \frac{1 - \omega^2 L_P C_1}{2 - \omega^2 L_P (C_0 + C_1)}} - 2 \right) . E_a \qquad (۲)$$

طبق رابطه فوق، L_P اندوکتانس راکتور جبران‌ساز، ω فرکانس زاویه‌ای و همچنین E_a مقدار ولتاژ مؤثر سمت منبع در فاز بازشده، می‌باشد.

شایان ذکر است که در هر دو حالت وجود و یا عدم وجود راکتور، دامنه نهایی ولتاژ فاز بازشده، در شرایطی که هر سه‌فاز برق‌دار و یا در شرایطی که هنوز خطای گذرا یا دائم رفع نشده است، برابر می‌باشد؛ لذا، با توجه به اینکه مقدار V_y پایین‌تر از مقدار V_{yr} است، ولتاژ فاز باز شده، پس از رفع خطا، سریعتر به مقدار V_y می‌رسد. بنابراین در این شرایط و به جهت تشخیص سریع‌تر خاموشی قوس ثانویه و یا تشخیص عدم وقوع خطا در خطوط مجهز به راکتور، می‌توان از V_y به‌عنوان یک مقدار آستانه استفاده نمود.

۳-تشخیص عدم وجود خطا و یا خاموشی قوس ثانویه در فاز باز شده

به‌طور کلی در خطوط انتقال، امکان باز شدن یک فاز، توسط رله‌های حفاظتی، در شرایط مختلف خطای دائم، خطای گذرا و یا بدون خطا وجود دارد. در شرایطی که فاز معیوب با وقوع خطای دائمی باز شده باشد، وصل مجدد این فاز امکان‌پذیر نبوده و می‌بایست فرمان باز شدن هر سه فاز صادر شود. همچنین در حالت باز شدن یک فاز پس از وقوع یک خطای تک‌فاز گذرا، به جهت وصل مجدد این فاز، می‌بایست از خاموشی قوس ثانویه اطمینان حاصل شود. در این خصوص لازم است تا جهت تشخیص عدم وجود خطا پس از باز شدن یک فاز و همچنین تشخیص خاموشی قوس ثانویه با وجود خطای گذرا، بررسی‌های مورد نظر صورت پذیرد که در ذیل بررسی می‌گردد.

۳-۱-تشخیص عدم وجود خطا پس از باز شدن یک فاز

در صورت باز شدن کاذب و بدون خطا یک فاز خط انتقال توسط سیستم حفاظتی، رابطه زیر برقرار خواهد بود [۱۶].

$$|V_n(t)| > \sqrt{2} V_y \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، $V_n(t)$ مقدار مؤلفه اصلی ولتاژ در طرفین فاز باز شده است که به صورت مداوم اندازه‌گیری می‌شود. V_y مقدار آستانه تشخیص شرایط بدون خطا می‌باشد. با بررسی این رابطه، می‌توان از عدم وجود خطا و یا خاموشی قوس ثانویه در فاز باز شده اطمینان حاصل نمود. لیکن در صورت عدم برقراری رابطه (۳) در مدت زمان مجاز دوفاز بودن خط (T_{max})، فرمان باز شدن خط صادر خواهد شد [۲۳]. شایان

UNCORRECTED PROOF

ذکر است که در صورت باز شدن یک فاز بدون وقوع خطا و یا رفع خطای گذرا در فاز بازشده، دامنه $V_n(t)$، در خط بدون راکتور، در مدت یک‌چهارم سیکل و در خط مجهز به راکتور، پس از ۳ تا ۵ سیکل به حداکثر مقدار خود ($V_n(max)$) خواهد رسید [۲۴].

۳-۲-تشخیص خاموشی قوس ثانویه پس از باز شدن یک فاز

مطابق آنچه در قبل بیان گردید، پس از وقوع خطای تک‌فاز گذرا، فاز معیوب توسط سیستم حفاظتی باز می‌شود. بلافاصله پس از این امر، قوس اولیه خاموش شده و قوس ثانویه شروع می‌گردد. رفتار و مشخصه دینامیکی قوس ثانویه را می‌توان مطابق با مدل Johns و با روابط (۴) تا (۱۰) بیان نمود [۲].

$$\frac{dg_s}{dt} = \frac{1}{T_s}(G_s - g_s) \qquad (۴)$$

که در آن، T_s ثابت زمانی قوس ثانویه برحسب ثانیه، g_s رسانایی متغیر با زمان قوس ثانویه بر حسب زیمنس می‌باشد. همچنین G_s رسانایی ثابت قوس ثانویه بر حسب زیمنس بوده و با رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$G_s = \frac{|i|}{V_s L_s(t_r)} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، $|i|$ اندازه جریان قوس ثانویه بر حسب آمپر، $L_s(t_r)$ طول قوس بر حسب متر و t_r مدت زمان از لحظه‌ی باز شدن فاز معیوب بر حسب ثانیه می‌باشد. V_s افت ولتاژ مؤثر در هر سانتیمتر هوا بر روی ستون قوس ثانویه (گرادیان ولتاژ قوس ثانویه) بر حسب ولت بر سانتی‌متر بوده و با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$V_S = 75 I_s^{0.4} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق، I_s ماکزیمم جریان قوس ثانویه می‌باشد. این پارامتر با فرض اینکه فاز بازشده با مقاومت صفر زمین شده است، حاصل می‌شود. مطابق با روش Johns با گذشت زمان، طول قوس ثانویه در اثر وزش باد افزایش یافته و می‌تواند از رابطه زیر بدست آید.

$$\frac{L_s(t_r)}{L_{S0}} = \begin{cases} 10t_r & t_r > 0.1s \\ 1 & t_r \le 0.1s \end{cases} \qquad (۷)$$

که در رابطه فوق، L_{s0} طول اولیه قوس (طول زنجیره مقره) بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. همچنین ولتاژ دو سر قوس ثانویه از رابطه (۸) حاصل می‌گردد.

$$V_{ARC}(t) = \begin{cases} 10V_S L_{S0} t_r & t_r > 0.1s \\ V_S L_{S0} & t_r \le 0.1s \end{cases} \qquad (۸)$$

با توجه به ناچیز بودن جریان عبوری از خط در حین وجود قوس ثانویه، می‌توان $V_{ARC}(t)$ را برابر با $V_n(t)$ فرض کرد. ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد ($V_r(t_r)$) در محل خطا با رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$V_r(t_r) = \left[5 + \frac{1620T_e}{2.15+I_s}\right] \times L_s(t_r)(t_r - T_e) \times h(t_r - T_e) \times 10^3 \quad [V] \qquad (۹)$$

در رابطه فوق، T_e در مدت زمان خاموشی قوس برابر t_r بوده ولذا هرگاه قوس ثانویه خاموش شود مقدار T_e ثابت مانده و t_r افزایش می‌یابد. تابع h نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$h(t_r - T_e) = \begin{cases} 1 & t_r > T_e \\ 0 & t_r \le T_e \end{cases} \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق، h معرف قید تابعی است که پس از روشن شدن قوس ثانویه برابر با صفر شده و باعث صفر شدن اندازه $V_r(t_r)$ می‌شود. همچنین با خاموشی قوس ثانویه، مقدار تابع h برابر یک شده و سبب می‌شود که اندازه $V_r(t_r)$ غیر صفر گردد. روشن و خاموش شدن قوس ثانویه در هر سیکل ادامه یافته و زمانی به طور کامل خاموش می‌شود که اندازه $V_r(t_r)$ از مقدار ولتاژ قوس ثانویه فراتر رود.

در این حالت نیز مشابه حالت باز شدن یک فاز خط در حالت بدون خطا، می‌بایست رابطه (۳) به جهت تشخیص خاموشی قوس ثانویه، برقرار باشد [۳]. لیکن در صورت عدم برقراری رابطه (۳) تا پایان مدت زمان مجاز دوفاز بودن شبکه (T_{max})، فرمان باز شدن سه فاز خط صادر خواهد شد.

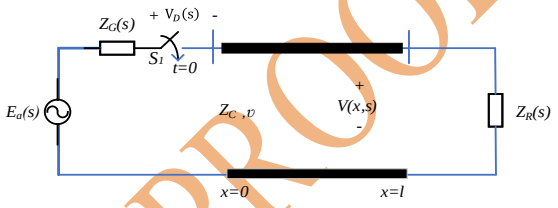
۴-برآورد دامنه اضافه ولتاژ فاز باز شده در لحظه‌ی وصل مجدد

درصورتی‌که ولتاژ لحظه‌ی وصل مجدد یک فاز خط، از مقدار SIWL تجهیزات شبکه بالاتر رود، تنش زیادی بر عایق تجهیزات اعمال شده و حتی باعث ایجاد خسارات جبران ناپذیری می‌شود. حسب مطالعات حالت گذرا، دو شرط لازم برای ایجاد حداکثر ولتاژ گذرای لحظه‌ی وصل ($V_{RE}(max)$) عبارتند از: ۱) وصل مجدد فاز باز شده در یکی از طرفین خط درحالی‌که این فاز از سمت دیگر باز است؛ ۲) اختلاف پتانسیل بین ولتاژ فاز باز شده و ولتاژ سمت منبع این فاز ($V_D(t)$)، در لحظه وصل، حداکثر مقدار ممکن باشد [۲۵]. هنگامی که فاز بازشده مجدداً وصل می‌شود، یک موج با دامنه $V_D(t)$ از ابتدا به انتهای خط ارسال شده و اندازه آن تأثیر مستقیم در مقدار $V_{RE}(max)$ خواهد داشت. شایان ذکر است در سیستم سنتی حفاظت خطوط انتقال، با توجه

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

به وجود تأخیر بین فرمان رله حفاظتی و عملکرد کنتاکت‌های کلید، کنتاکت‌های کلید با تأخیر ۲۰ تا ۸۰ میلی‌ثانیه نسبت به زمان ارسال فرمان رله، وصل می‌شوند. بنابراین، امکان تعیین دقیق زمان وصل مجدد در حالتی که $V_D(t)$ دارای کمترین مقدار ممکن باشد وجود نداشته و حتی این احتمال وجود دارد که مقدار آن در زمان وصل ماکزیمم باشد. به جهت تحلیل اضافه ولتاژ کلیدزنی، مدار معادل یک فاز از یک خط انتقال ساده در شکل (۱) نشان داده شده است. این خط مجهز به کلید بدون مقاومت وصل در ابتدای خط می‌باشد.



شکل ۱- مدار معادل یک فاز از خط انتقال مجهز به کلید بدون مقاومت وصل (در حوزه لاپلاس)

در شکل (۱)، $Z_G(s)$ امپدانس منبع، $Z_R(s)$ امپدانس بار و $V_D(s)$ اختلاف ولتاژ بین کنتاکت‌های کلید S_1 در لحظه‌ی $t=0$ در حوزه لاپلاس می‌باشند. Z_c امپدانس مشخصه خط انتقال با طول l بوده و $E_a(s)$ ولتاژ منبع در حوزه لاپلاس می‌باشد. در هر نقطه از این خط به فاصله x از منبع، دامنه ولتاژ در حوزه لاپلاس از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۵].

$$V(x,s) = \mathrm{V_D(s)}\left[\frac{Z_C}{Z_G(s)+Z_C}\right]\left[\frac{e^{\frac{-sx}{v}}+\Gamma_R(s)e^{s\left(\frac{x}{v}-2\tau\right)}}{1-\Gamma_R(s)\Gamma_S(s)e^{-2s\tau}}\right] \quad (۱۱)$$

در رابطه فوق، τ مدت زمان سیر موج از ابتدا به انتهای خط و v سرعت انتشار موج می‌باشد. $\Gamma_R(s)$ و $\Gamma_S(s)$ به ترتیب ضرایب انعکاس انتها و ابتدای خط در حوزه لاپلاس بوده و از روابط (۱۲) و (۱۳) به‌دست می‌آیند.

$$\Gamma_R(s) = \frac{Z_R(s)-Z_C}{Z_R(s)+Z_C} \quad (۱۲)$$

$$\Gamma_S(s) = \frac{Z_G(s)-Z_C}{Z_G(s)+Z_C} \quad (۱۳)$$

در شکل (۱) کلید در ابتدا باز بوده و در $t=0$ وصل می‌شود. با فرض باز بودن انتهای خط، یکی از شروط ایجاد حداکثر ولتاژ گذرای لحظه‌ی وصل، برقرار می‌باشد. بنابراین، $\Gamma_R(s)$ برابر با ۱ بوده و با فرض ناچیز بودن مقاومت منبع در ابتدای خط، امپدانس منبع به‌صورت اندوکتانس خالص L در نظر گرفته می‌شود $(Z_G(s)=Ls)$. بر این اساس، ولتاژ انتهای خط با طول l، در حوزه لاپلاس از رابطه زیر بدست می‌آید[۲۵].

$$V(l,s) = \mathrm{V_D(s)}\left[\frac{Z_C}{Ls+Z_C}\right]\left[\frac{e^{-s\tau}+(1)e^{-s\tau}}{1-(1)\Gamma_S(s)e^{-2s\tau}}\right] \quad (۱۴)$$

از طرفی، رابطه فوق را می‌توان با استفاده از سری هندسی به صورت رابطه (۱۵) نیز بیان نمود.

$$V(l,s) = \mathrm{V_D(s)}\left[\frac{Z_C}{Ls+Z_C}\right][2e^{-s\tau} + 2\Gamma_s(s)e^{-3s\tau} + 3\Gamma^2{}_s(s)e^{-5s\tau} + \cdots] \quad (۱۵)$$

حداکثر ولتاژ القایی در فاز بازشده، $V_n(max)$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اختلاف فاز تقریبی ۱۸۰ درجه بین $V_n(max)$ و ولتاژ سمت منبع E_a، حداکثر اختلاف ولتاژ ممکن بین دوسر کلید این فاز $(V_D(max))$، می‌تواند به صورت رابطه زیر تعریف شود.

$$V_D(max) = \sqrt{2}E_a + V_n(max) \quad (۱۶)$$

با توجه به اینکه حداکثر اضافه ولتاژ، در لحظات اولیه پس از وصل کلید اتفاق افتاده و در رفت و برگشت‌های موج ولتاژ در طول خط، به دلیل تلفات خط، اندازه آن کاهش می‌یابد، می‌توان صرفاً دو جمله اول رابطه (۱۵) را در نظر گرفته و از مابقی جملات صرف نظر نمود. با جای‌گذاری روابط (۱۳) و (۱۶) در رابطه (۱۵)، رابطه (۱۷) حاصل خواهد شد.

$$V(l,s) = \frac{V_D(max)}{s}\left[\frac{Z_C}{Ls+Z_C}\right]\left[2e^{-s\tau} + 2\frac{Ls-Z_C}{Ls+Z_C}e^{-3s\tau}\right] \quad (۱۷)$$

حال با استفاده از معکوس لاپلاس رابطه فوق، ولتاژ انتهای خط، در حوزه زمان به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌گردد.

$$V_{RE}(t) = \underbrace{2V_D(max)\left[1-e^{\frac{-z_C(t-\tau)}{L}}\right]}_{A}H(t-\tau) + \underbrace{2V_D(max)\left[e^{\frac{-z_C(t-3\tau)}{L}} + \frac{2z_C(t-3\tau)}{L}e^{\frac{-z_C(t-3\tau)}{L}} - 1\right]}_{B}H(t-3\tau) \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق، $V_{RE}(t)$ ولتاژ انتهای خط، در حوزه زمان بوده و H تابعی است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$H(t-m\tau) = \begin{cases} 0 & t \le m\tau \\ 1 & t > m\tau \end{cases} \quad (۱۹)$$

در رابطه فوق، m ضریبی از زمان سیر موج در طول خط می‌باشد. حال به جهت تعیین زمان رسیدن $V_{RE}(t)$ به حداکثر مقدار خود، لازم است تا مشتق تابع $V_{RE}(t)$ نسبت به زمان در $t>3\tau$ محاسبه و برابر صفر قرار گیرد. مطابق رابطه (۱۸) تغییرات جمله اول (جمله A) از $t=\tau$ شروع و در $t>3\tau$ ، مقدار آن ثابت شده و برابر با $2V_D(max)$ می‌شود. لذا مشتق این جمله در $t>3\tau$ برابر صفر می‌گردد. بنابراین تنها از مشتق جمله دوم مربوط به رابطه (۱۸) (جمله B) می‌توان حداکثر مقدار تابع $V_{RE}(t)$ را محاسبه

UNCORRECTED PROOF

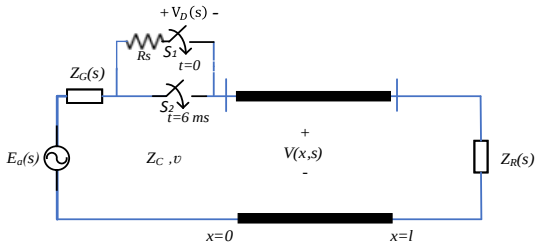
نمود. در رابطه زیر، t_m زمان لازم برای رسیدن $V_{RE}(t)$ به حداکثر مقدار خود است.

$$t_m = \frac{L}{2Z_c} + 3\tau \ [sec] \quad (۲۰)$$

با توجه به اینکه جمله اول رابطه (۱۸) در $t>3\tau$ به مقدار ثابتی می‌رسد (مقداری برابر با $2V_D(max)$)، با جایگذاری t_m در جمله دوم رابطه (۱۸)، حداکثر اضافه ولتاژ در انتهای فاز باز پس از وصل کلید ($V_{RE}(max)$)، مطابق رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$V_{RE}(max) = 2V_D(max) + 2V_D(max)\left[e^{\frac{-z_c(t_m-3\tau)}{L}} + \frac{2z_c(t_m-3\tau)}{L}e^{\frac{-z_c(t_m-3\tau)}{L}} - 1\right] \quad (۲۱)$$

علاوه بر موارد فوق از آنجایی که در کلیدهای با سطح ولتاژ بالاتر از ۲۳۰ کیلوولت، از مقاومت وصل به جهت کاهش اضافه ولتاژهای کلیدزنی استفاده می‌شود، در ادامه این اثر، مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. لذا در شکل (۲) مدار معادل یک فاز از خط انتقال مجهز به کلید با مقاومت وصل در حوزه لاپلاس نشان داده شده است. در شکل (۲)، مقدار R_s مقاومت وصل کلید و Z_c امپدانس مشخصه خط انتقال بر حسب اهم می‌باشند. ابتدا و قبل از عمل وصل، هردو کلید S_1 و S_2 به صورت باز در نظر گرفته می‌شوند. در شروع عمل وصل، بلافاصله پس از بسته شدن کلید S_1، اندازه $V_D(s)$ بین R_s و Z_c تقسیم می‌شود.



شکل ۲- مدار معادل یک فاز از خط انتقال همراه با کلید دارای مقاومت وصل (در حوزه لاپلاس)

بنابراین در حالت کلیدزنی با مقاومت وصل، دامنه موج سیار کاهش یافته و لذا اضافه ولتاژ کمتری نسبت به حالت کلیدزنی بدون مقاومت وصل، حاصل خواهد شد. در ادامه، پس از چند رفت و برگشت موج ولتاژ در طول هادی خط (در مدت ۶ تا ۱۲ میلی‌ثانیه)، ولتاژ مقاومت وصل و همچنین کلید S_2 تا حد زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین در مرحله دوم پس از وصل کلید S_2، تغییرات ولتاژ دو سر این کلید، و در نتیجه دامنه موج ارسالی کاهش یافته و اضافه ولتاژ کمتری ایجاد می‌گردد. حال به جهت دستیابی به بهترین شرایط کلید زنی با هدف کاهش اضافه ولتاژ، مقاومت وصل برابر با امپدانس مشخصه خط در نظر گرفته شده ($R_s = Z_c$) و رابطه (۱۷) به صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$V(l,s) = \frac{V_D(max)}{s}\left[\frac{Z_c}{Ls+2Z_c}\right][2e^{-s\tau} + 2\frac{Ls}{Ls+2Z_c}e^{-3s\tau}] \quad (۲۲)$$

در ادامه با عکس تبدیل لاپلاس رابطه فوق، ولتاژ انتهای خط، پس از وصل کلید S_2، به‌صورت زیر خواهد بود.

$$V_{RE}(t) = \underbrace{V_D(max)\left[1 - e^{\frac{-2Z_c(t-\tau)}{L}}\right]}_{A} H(t-\tau) \quad (۲۳)$$
$$+ \underbrace{\frac{V_D(max)Z_c}{L}\left[(t-3\tau)e^{\frac{-2Z_c(t-3\tau)}{L}}\right]}_{B} H(t-3\tau)$$

حال، به جهت تعیین زمان رسیدن دامنه $V_{RE}(t)$ به حداکثر مقدار خود، کافی است تا مشتق تابع $V_{RE}(t)$ نسبت به زمان برابر صفر قرار داده شود. با توجه به اینکه تغییرات جمله اول رابطه (۲۳) (جمله A)، از لحظه‌ی $t=\tau$ شروع شده و در $t>3\tau$ مقدار آن تقریباً ثابت و برابر با $V_D(max)$ می‌شود، مشتق جمله اول در $t>3\tau$ برابر صفر خواهد بود. لذا با صفر قرار دادن مشتق جمله دوم رابطه (۲۳) (جمله B) نسبت به زمان، t_m به صورت زیر بدست می‌آید.

$$t_m = \frac{L}{2Z_c} + 3\tau \ [\text{sec}] \quad (۲۴)$$

از طرفی با توجه به ثابت شدن تغییرات جمله اول رابطه (۲۳) در $t>3\tau$ و با جایگذاری t_m و مقدار نهایی جمله اول ($V_D(max)$) در رابطه (۲۳)، حداکثر اضافه ولتاژ در انتهای فاز باز شده، پس از وصل کلید، مطابق رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$V_{RE}(max) = V_D(max) + \frac{2V_D(max)Z_c}{L}\left[(t_m - 3\tau)e^{\frac{-2Z_c(t_m-3\tau)}{L}}\right] \quad (۲۵)$$

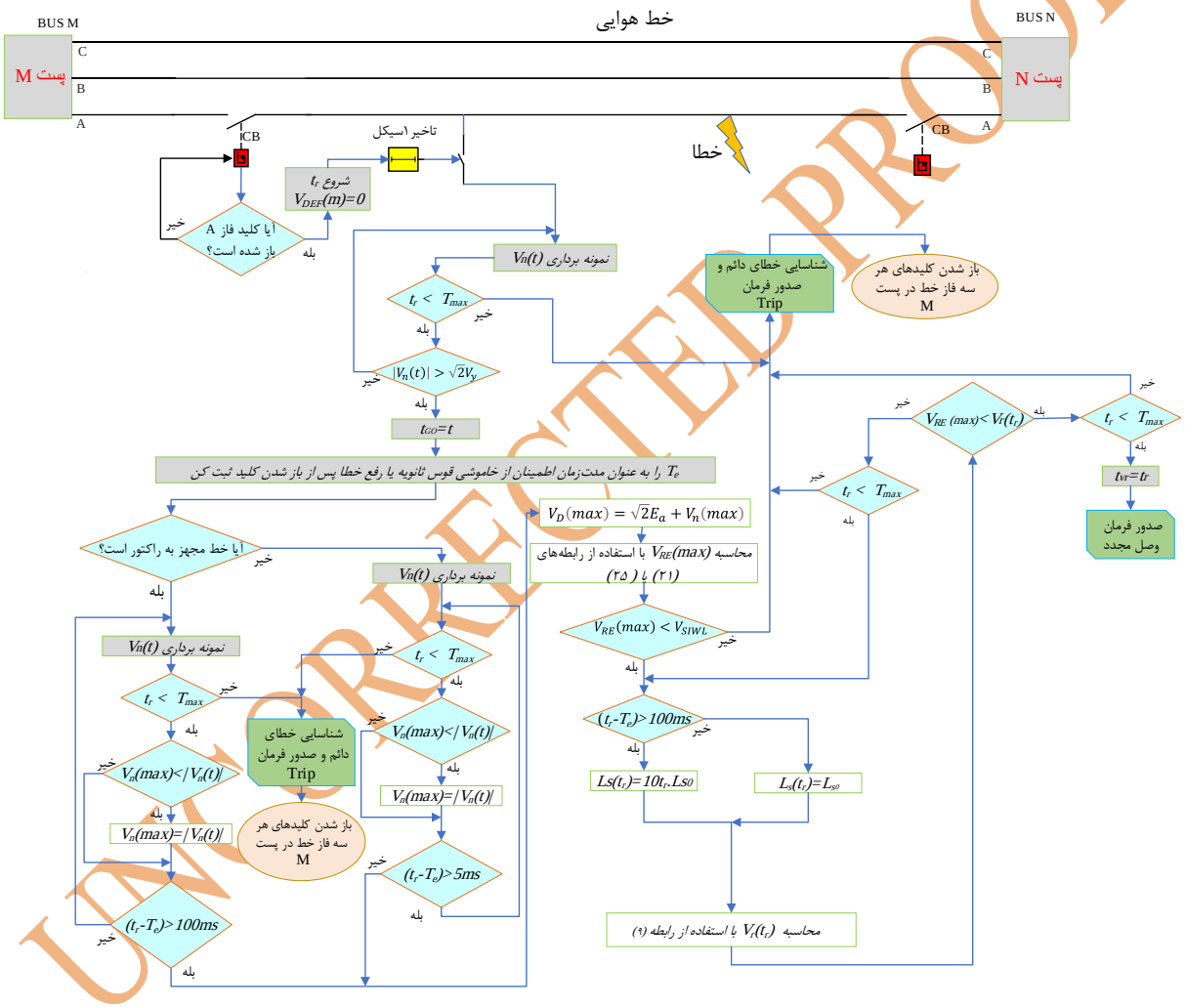
حال، در صورت وجود راکتور جبران‌ساز در یکی از طرفین خط انتقال، امپدانس در طرفی از خط که مجهز به راکتور است نسبت به حالت بدون راکتور، کاهش می‌یابد. بنابراین، جهت کاهش اضافه ولتاژ کلیدزنی در خط مجهز به راکتور، می‌بایست وصل مجدد فاز باز شده از طرفی که به راکتور مجهز نیست، انجام شود. لذا، با توجه به پایین‌تر بودن اضافه ولتاژ کلیدزنی در خط مجهز به راکتور نسبت به خط بدون راکتور، با حفظ حاشیه امنیت، مقدار $V_{RE}(max)$ محاسبه شده در خط بدون راکتور، می‌تواند به عنوان معیار برای خط مجهز به راکتور نیز در نظر گرفته شود.

۵-روش پیشنهادی

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

در شکل (۳) الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین زمان دقیق وصل مجدد در خط هوایی حسب شرایط عایقی محل خطا پس از خاموشی قوس ثانویه، نشان داده شده است. در مرحله اول الگوریتم پیشنهادی که مربوط به تعیین زمان خاموشی قوس ثانویه است، نمونه‌برداری از $V_n\ (t)$ در فاز معیوب و پس از مدت یک سیکل از باز شدن این فاز انجام می‌شود. در صورتی که اندازه $V_n\ (t)$ از ماکزیمم مقدار ولتاژ آستانه خاموشی قوس ثانویه و یا عدم وجود خطا فراتر رود، (t_{GO}) به عنوان زمان اطمینان از خاموشی قوس ثانویه یا عدم وجود خطا ثبت شده و الگوریتم ادامه می‌یابد. در ادامه و در مرحله دوم الگوریتم، مقدار $V_n(max)$ در خطوط بدون راکتور، حداکثر تا ۵ میلی‌ثانیه و در خطوط مجهز به راکتور، حداکثر تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه پس از شروع این مرحله، اندازه‌گیری شده و با استفاده از آن، مقدار $V_D(max)$ به‌دست می‌آید. در مرحله سوم، مقدار $V_{RE}(max)$ محاسبه می‌گردد. در صورتی که مقدار $V_{RE}(max)$ کوچکتر از سطح ولتاژ قابل تحمل کلیدزنی خط ($SIWL$) باشد، الگوریتم ادامه یافته و در غیر اینصورت فرمان باز شدن خط صادر می‌شود. در ادامه نیز طول قوس ثانویه به طور مداوم محاسبه و از روی آن ولتاژ $V_r(t_r)$ به‌دست می‌آید.



شکل ۳- الگوریتم پیشنهادی برای تعیین زمان دقیق وصل مجدد با توجه به شرایط عایقی محل خطا و پس از خاموشی قوس ثانویه

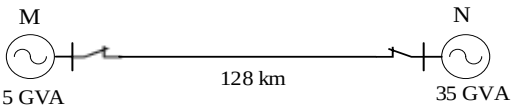
در صورت تجاوز مقدار $V_r(t_r)$ از مقدار $V_{RE}(max)$، فرمان وصل مجدد و در غیر اینصورت فرمان باز شدن خط صادر می‌گردد. در هر یک از مراحل فوق در صورت اتمام زمان مجاز دوفاز بودن خط، الگوریتم متوقف و فرمان باز شدن هر سه فاز خط صادر خواهد شد.

۶-شبیه‌سازی خط مورد مطالعه و تحلیل نتایج

در شکل (۴) یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت تک‌مداره به طول ۱۲۸ کیلومتر، به منظور شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است [۲]. مطابق شکل (۴) خط مورد مطالعه، خط واصل بین دو پست M و N می‌باشد. توان اتصال کوتاه پست‌های M و N به ترتیب برابر با ۵ و ۳۵

UNCORRECTED PROOF

گیگاولت‌آمپر می‌باشد. مشخصات این خط در جدول (۱) آورده شده است [۲].



شکل ۴- خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت مورد مطالعه [۲]

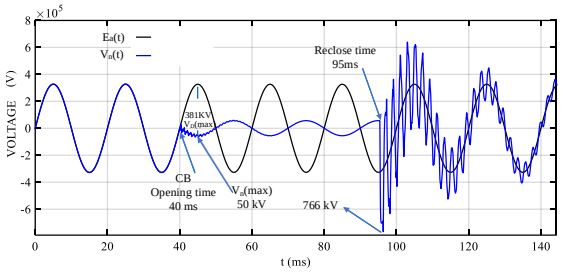
جدول ۱- مشخصات خط انتقال ۴۰۰کیلوولت مورد مطالعه [۲]

پارامتر	مقدار
امپدانس توالی صفر	۱۰۳∢۸۶° اهم
امپدانس توالی مثبت	۳۷∢۸۸° اهم
ظرفیت خازنی توالی صفر	۰.۹۱۹ میکرو فاراد
ظرفیت خازنی توالی مثبت	۱.۵۸۷ میکرو فاراد
آستانه خاموشی قوس ثانویه و یا عدم وجود خطا	۳۷ کیلوولت
مقاومت وصل کلید	۲۷۴ اهم

در این مطالعات و مطابق استاندارد، سطح ولتاژ قابل تحمل کلیدزنی (SIWL) تجهیزات شبکه در خطوط ۴۰۰ کیلوولت برابر با ۱۰۵۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است. به جهت سهولت محاسبات، خط مذکور به صورت جابجا شده در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی و پیاده‌سازی آن، خط مورد مطالعه تحت انواع خطاهای تک‌فاز و در مکان‌های مختلف، در نرم افزار *EMTP-RV* شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها در شرایط بدون خطا و یا با وجود خطای تک‌فاز به زمین در t=15 ms انجام شده‌اند. در تمام شبیه‌سازی‌ها، به جهت بررسی حداکثر اضافه ولتاژ حاصله، وصل مجدد فاز باز شده در حداکثر مقدار $V_D(t)$ انجام خواهد شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌ها در حالت باز شدن تک‌فاز خط انتقال در شرایط بدون وقوع خطا و همچنین با وجود خطای تک‌فاز گذرا، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۶-۱-باز شدن یک فاز خط در شرایط بدون وقوع خطا

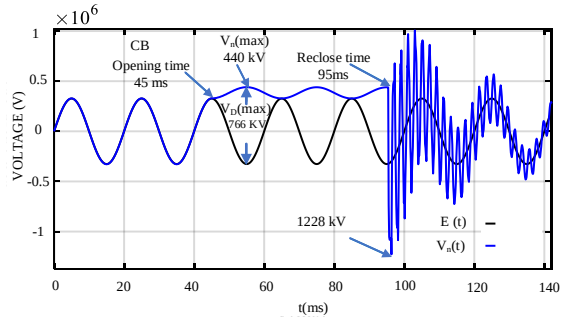
در این قسمت ابتدا فرض می‌گردد که فاز A بدون وقوع هیچ گونه خطایی در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه و در لحظه‌ی صفر ولتاژ، از دو سمت خط و توسط کلیدهای بدون مقاومت وصل، باز می‌شود. در ادامه و هنگامی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود است (در زمان ۹۵ میلی‌ثانیه)، کلید فاز A از طرف پست M وصل می‌شود (در حالیکه فاز A از سمت پست N همچنان باز است). در شکل (۵)، ولتاژهای سمت منبع در پست M (E_a) و سمت خط در پست N ($V_n(t)$)، تحت این شرایط نشان داده شده است.



شکل ۵- ولتاژهای سمت منبع در پست M و سمت خط فاز A در پست N در طول عملیات بازبست (قطع فاز A توسط کلید های بدون مقاومت وصل در $V_n(t)=0$ و وصل مجدد آن در $(V_D(t)=V_D(max)$

مطابق شکل (۵)، با توجه به آنکه ولتاژ فاز A در لحظه‌ی باز شدن برابر صفر می‌باشد، مقدار $V_D(max)$ کاهش می‌یابد. لذا حداکثر ولتاژ حاصل پس از وصل مجدد برابر با ۷۶۶ کیلوولت حاصل می‌شود. از طرفی با توجه به مقدار $V_D(max)$ که پس از خاموشی قوس ثانویه بدست آمده و همچنین با استفاده از رابطه (۲۱)، انتظار می‌رود که مقدار $V_{RE}(max)$ به ۸۹۱ کیلوولت برسد. لذا حداکثر ولتاژ پیش‌بینی شده وصل مجدد، کمتر از $SIWL$ خواهد بود. به عبارتی، با توجه به عدم برقراری شرط $V_{RE}(max)>SIWL$، نیازی به باز شدن خط نبوده و الگوریتم به جهت بررسی شرایط وصل مجدد، روند خود را ادامه خواهد داد.

در سناریویی دیگر، فرض می‌شود که فاز A بدون وقوع هیچ‌گونه خطایی در لحظه‌ی ۴۵ میلی‌ثانیه (در پیک ولتاژ) باز شود. بر این اساس و در شرایطی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود است (در زمان ۹۵ میلی‌ثانیه)، کلید فاز A از سمت پست M وصل می‌شود در حالی که فاز A از سمت پست N همچنان باز است. شکل (۶)، ولتاژهای سمت منبع در پست M (E_a) و سمت خط در پست N ($V_n(t)$) را در این شرایط نشان می‌دهد.

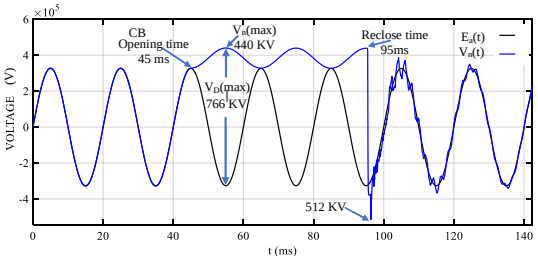


شکل ۶- ولتاژهای سمت منبع در پست M و سمت خط فاز A در پست N در طول عملیات بازبست (قطع فاز A توسط کلید های بدون مقاومت وصل در پیک ولتاژ و وصل مجدد آن در $(V_D(t)=V_D(max)$

CORRECTED PROOF

مطابق شکل (۶)، با توجه به آنکه فاز A در پیک ولتاژ نامی خود باز شده، مقدار $V_D(max)$ بیشترین مقدار ممکن خواهد بود. لذا حداکثر ولتاژ حاصل پس از وصل مجدد برابر با ۱۲۲۸ کیلوولت بوده که بالاتر از مقدار $SIWL$ می‌باشد. از طرفی با توجه به مقدار $V_D(max)$ که پس از خاموشی قوس ثانویه بدست آمده و همچنین با استفاده از رابطه (۲۱)، $V_{RE}(max)$ برابر ۱۵۵۸ کیلوولت برآورد می‌شود. لذا با توجه به بالاتر بودن مقدار $V_{RE}(max)$ از $SIWL$، و به جهت جلوگیری از صدمه دیدن احتمالی تجهیزات شبکه، اجازه وصل مجدد صادر نشده و خط می‌بایست باز شود.

در ادامه این حالت یعنی قطع فاز A در پیک ولتاژ و در شرایط بدون خطا و در لحظه‌ی ۴۵ میلی‌ثانیه، با فرض آنکه کلید دارای مقاومت وصل ۲۷۴ اهمی باشد بررسی‌های لازم انجام می‌گردد. در مرحله اول، مقاومت‌های وصل کلید فاز A، هنگامی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود یعنی $V_D(max)$ است، از سمت پست M وصل می‌شود (در شرایطی که فاز A از سمت پست N باز است). در ادامه و پس از گذشت ۶ میلی‌ثانیه، کنتاکت‌های اصلی کلید فاز A بسته می‌شود. در شکل (۷)، ولتاژهای سمت منبع پست M (E_a) و سمت خط در پست N ($V_n(t)$)، تحت این شرایط نشان داده شده است.

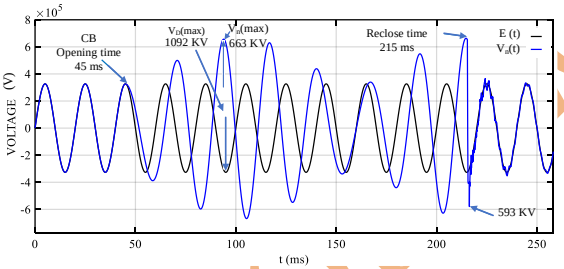


شکل ۷- ولتاژهای سمت منبع در پست M و سمت خط فاز A در پست N در طول عملیات بازبست (قطع فاز A توسط کلیدهای مجهز به مقاومت وصل در پیک ولتاژ و وصل مجدد آن در $V_D(t)=V_D(max)$)

مطابق شکل (۷)، حداکثر ولتاژ ایجاد شده پس از وصل مجدد برابر با ۵۱۲ کیلوولت بوده که پایینتر از مقدار $SIWL$ می‌باشد. از طرفی با توجه به مقدار $V_D(max)$ که پس از اطمینان از عدم وجود خطا، حاصل شده است و با استفاده از رابطه (۲۵) انتظار می‌رود که در صورت وصل مجدد فاز A، در لحظه‌ای‌که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود باشد، $V_{RE}(max)$ به ۸۹۱ کیلوولت برسد. بنابراین در این حالت، $V_{RE}(max)$ نسبت به حالتی که کلید به مقاومت وصل مجهز نیست، کمتر است. لذا با توجه به اینکه در این حالت ولتاژ برآورد شده کمتر از $SIWL$ است، نیازی به باز شدن خط نبوده و مطابق الگوریتم سایر شرایط وصل مجدد فراهم می‌شود.

همچنین در حالت قطع فاز A در لحظه‌ی ۴۵ میلی‌ثانیه و تحت شرایط بدون خطا فرض می‌شود که یک راکتور ۵۰ مگاوار نیز در پست N وجود داشته باشد. در حالتی که کلیدهای طرفین فاز A به مقاومت وصل مجهز باشند، ابتدا مقاومت های وصل کلید در پست M، هنگامی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود یعنی $V_D(max)$ است، وصل می‌گردد. کنتاکت‌های اصلی این کلید نیز، ۶ میلی‌ثانیه پس از بسته شدن مقاومت‌های وصل، بسته می‌شوند. شکل (۸)، ولتاژهای سمت منبع در پست M (E_a) و سمت خط در پست N ($V_n(t)$) را تحت این شرایط نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۸)، حداکثر ولتاژ حاصله پس از وصل مجدد برابر با ۵۹۳ کیلوولت بوده که پایینتر از مقدار $SIWL$ می‌باشد. از طرفی با توجه به مقدار $V_D(max)$ که پس از اطمینان از عدم وجود خطا، حاصل شده است و با استفاده از رابطه (۲۵) انتظار می‌رود که در صورت وصل مجدد فاز باز شده در شرایطی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود است، مقدار $V_{RE}(max)$ به ۸۲۹ کیلوولت برسد.



شکل ۸- ولتاژهای سمت منبع در پست M و سمت خط فاز A در پست N در طول عملیات بازبست برای خط مجهز به راکتور (قطع فاز A توسط کلیدهای مجهز به مقاومت وصل در پیک ولتاژ و وصل مجدد آن در $V_D(t)=V_D(max)$)

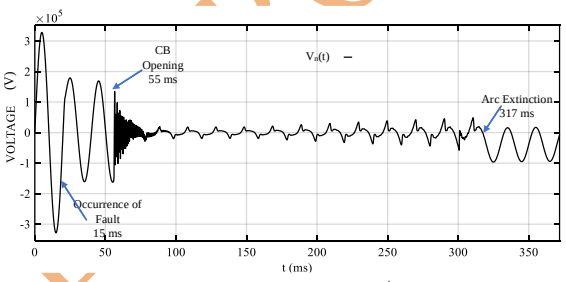
لذا حداکثر ولتاژ پیش‌بینی شده وصل مجدد، کمتر از $SIWL$ خواهد بود. بنابراین در این حالت، نیازی به باز شدن خط نبوده و الگوریتم جهت بررسی سایر شرایط وصل مجدد ادامه می‌یابد.

۶-۲-باز شدن یک فاز خط در شرایط وقوع خطای تک‌فاز گذرا

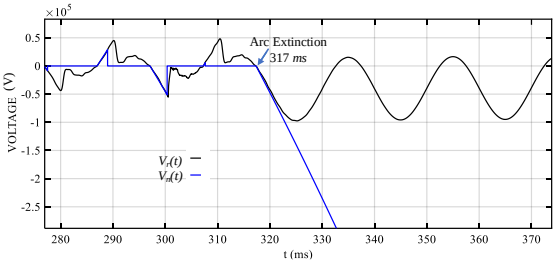
در این قسمت، عملکرد روش پیشنهادی پس از وقوع خطای گذرا در یکی از فازها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. حال به جهت بررسی ولتاژ فاز A در مراحل مختلف عملیات باز

UNCORRECTED PROOF

بست، یک خطای تک‌فاز گذرا در این فاز و در وسط خط انتقال و در لحظه‌ی $t=15\ ms$ در نظر گرفته می‌شود. پس از وقوع خطا، فاز معیوب در زمان ۵۵ میلی‌ثانیه باز می‌شود. در شکل (۹)، ولتاژ فاز A در سمت خط پست M ، تحت این شرایط نشان داده شده است. مطابق شکل (۹)، پس از باز شدن فاز معیوب A، قوس ثانویه در لحظه‌ی ۳۱۷ میلی‌ثانیه خاموش می‌شود. همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، زمانی قوس ثانویه خاموش می‌شود که دامنه ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد از دامنه ولتاژ فاز معیوب فراتر رود. لذا به جهت روشن شدن بیشتر این امر، در شکل (۱۰)، مقایسه ولتاژ فاز معیوب با ولتاژ لازم جهت ایجاد قوس مجدد، در زمان‌های قبل و بعد از خاموشی قوس ثانویه، نشان داده شده است.



شکل ۹- ولتاژ فاز A در سمت خط پست M، در طی مراحل بازبست پس از وقوع خطای گذرا



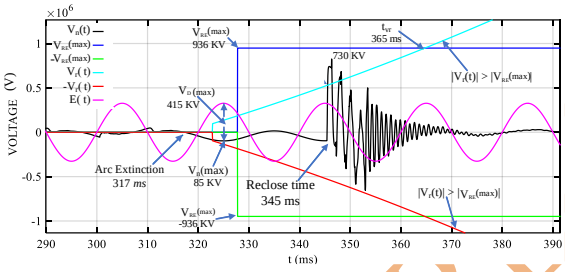
شکل ۱۰- مقایسه ولتاژ فاز معیوب A پس از باز شدن با مقدار ولتاژ قوس مجدد در مدت زمان‌های قبل و بعد از خاموشی قوس ثانویه

جهت بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی در حالت خطای گذرای تک‌فاز، شبیه‌سازی در دو سناریوی متفاوت شامل بدون در نظر گرفتن شرایط عایقی محل خطا و با در نظر گرفتن شرایط عایقی محل خطا، به شرح ذیل انجام شده است.

- **سناریوی اول: وصل مجدد فاز معیوب در الگوریتم پیشنهادی بدون در نظر گرفتن شرایط اضافه ولتاژ**

در این سناریو، یک خطای تک‌فاز گذرا در فاز A (وسط خط) و در زمان ۱۵ میلی‌ثانیه رخ داده و فاز معیوب در زمان ۵۵ میلی‌ثانیه باز می‌شود. در این حالت و پس از تشخیص خاموشی قوس ثانویه توسط الگوریتم بازبست تطبیقی، شرایط مربوط به اضافه ولتاژ در زمان وصل مجدد لحاظ نشده و فرمان وصل فاز مربوطه در پست M، بلافاصله پس از تعیین خاموشی قوس ثانویه صادر می‌شود. از طرفی، به جهت بررسی حداکثر ولتاژ حاصل در این سناریو، فاز A از سمت پست N، باز در نظر گرفته شده و وصل مجدد این فاز زمانی انجام می‌شود که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود است. همچنین کلیدهای طرفین خط، بدون مقاومت وصل فرض می‌شوند. در شکل (۱۱) ولتاژ سمت خط پست N و سایر ولتاژها تحت این شرایط نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۱)، مقدار $V_{RE}(max)$ برآورد شده برابر با ۹۳۶ کیلوولت می‌باشد. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که فرمان وصل مجدد می‌بایست بعد از زمان t_{vr} (زمان برقراری رابطه $|V_r(t_r)| > |V_{RE}(max)|$) انجام شود. لیکن با توجه به اینکه وصل مجدد فاز معیوب قبل از رسیدن به زمان t_{vr} انجام شد، عملیات بازبست با شکست روبرو خواهد شد.



شکل ۱۱- ارزیابی شرایط وصل مجدد فاز معیوب A بدون در نظرگرفتن شرایط اضافه ولتاژ در لحظه‌ی وصل مجدد

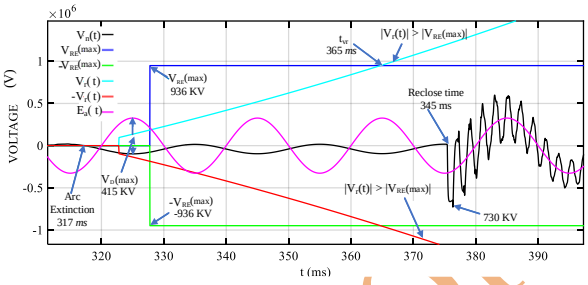
سناریوی دوم: وصل مجدد فاز معیوب در الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط اضافه ولتاژ

در این قسمت، فرض بر آن است که پس از تشخیص خاموشی قوس ثانویه توسط الگوریتم بازبست تطبیقی، شرایط مربوط به اضافه ولتاژ در لحظه‌ی وصل مجدد، در نظر گرفته شود. در شکل (۱۲) نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۲) مقدار $V_{RE}(max)$ برآورد شده حسب سناریوی قبلی برابر با ۹۳۶ کیلوولت خواهد بود. با توجه به اینکه در الگوریتم پیشنهادی و در این سناریو، شرایط مربوط به اضافه ولتاژ در زمان وصل مجدد در نظر گرفته شده، فرمان وصل مجدد فاز معیوب می‌تواند پس از زمان t_{vr} صادر شود. در این شبیه‌سازی مقدار t_{vr} برابر با ۳۶۵ میلی‌ثانیه حاصل شده است.

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، فرمان وصل مجدد فاز معیوب، بعد از زمان t_{vr} و در شرایطی که $V_D(t)$ در حداکثر مقدار خود است، صادر و عملیات بازبست با موفقیت انجام می‌گردد.



شکل ۱۲- بررسی شرایط وصل مجدد فاز معیوب A با در نظر گرفتن شرایط اضافه ولتاژ در لحظه وصل مجدد

۷- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم در چند سناریوی مختلف و در حالت باز شدن فاز معیوب تحت شرایط با و بدون وجود خطا و همچنین تحت شرایط با و بدون وجود راکتور ۵۰ مگاواری مورد مطالعه قرار گرفته است.

۷-۱- باز شدن فاز معیوب بدون وقوع خطا

در این قسمت، فاز A در خط مورد مطالعه، بدون هیچ گونه خطایی در لحظه‌ی ۴۵ میلی‌ثانیه و در پیک ولتاژ باز می‌شود. در جدول (۲) نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم پیشنهادی پس از باز شدن فاز A، تحت شرایط متفاوت بهره‌برداری ارائه شده است. در جدول (۲)، t_{GO} زمان اطمینان از عدم وجود خطا در فاز باز شده بوده و t_{vr} زمانی است که الگوریتم پیشنهادی، فرمان وصل مجدد را صادر می‌کند. همچنین این جدول نشان می‌دهد که در حالت بدون خطا، وقتی که کلید در حالت بدون مقاومت وصل، بسته می‌شود، مقدار $V_{RE}(max)$ فاز باز شده، بالاتر از $SIWL$ بوده و لذا فرمان باز شدن خط صادر می‌شود. همچنین در این حالت، استفاده از مقاومت وصل کلید قدرت باعث کاهش قابل توجه مقدار $V_{RE}(max)$ و موفقیت عملیات بازبست خواهد شد. بنابراین الگوریتم پیشنهادی در هر دو حالت با وجود و یا عدم وجود راکتور، عملکرد صحیحی را نشان می‌دهد.

۷-۲- باز شدن فاز معیوب پس از وقوع خطای گذرا

در این قسمت، سناریوی قبل در حالی تکرار می‌شود که باز شدن فاز معیوب خط ناشی از وقوع خطای گذرا باشد. در جدول (۳) عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد در خطوط مجهز به راکتور، بدون استفاده از مقاومت وصل کلید، با وقوع خطای گذرا بدلیل ایجاد مقدار $V_{RE}(max)$ بالاتر از $SIWL$، وصل مجدد فاز باز شده امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین در این حالت، مطابق الگوریتم پیشنهادی، فرمان باز شدن هر سه‌فاز خط ارسال خواهد شد. لیکن در سایر حالات با توجه اینکه مقدار $V_{RE}(max)$ پایینتر از $SIWL$ بوده، الگوریتم ادامه یافته و در زمان t_{vr} فرمان وصل مجدد فاز باز شده، صادر می‌شود.

حال با توجه به مطالعات فوق‌الذکر، ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با سایر روش‌ها، به لحاظ پیچیدگی محاسبات، تعیین آستانه دقیق، عملکرد در حالت وجود راکتور جبران‌ساز و فرکانس نمونه‌برداری در جدول (۴) نشان داده شده است.

بررسی جدول (۴) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها از عملکرد خوبی برخوردار می‌باشد. همچنین، نکته برجسته در روش پیشنهادی بررسی شرایط وصل از جهت تخمین میزان اضافه ولتاژ، پس از اطمینان از خاموشی قوس ثانویه می‌باشد که این مورد در سایر مطالعات در نظرگرفته نشده بود.

جدول ۲- عملکرد الگوریتم پیشنهادی پس از باز شدن یک فاز از خط مورد مطالعه تحت شرایط بدون وقوع خطا

شرایط آزمایش		t_{GO} [msec]	$V_D(max)$ [kV]	$V_{RE}(max)$ [kV]	t_{vr} [msec]	نتیجه عملکرد الگوریتم پیشنهادی
بدون مقاومت وصل کلید	بدون وجود راکتور	۶۵	۷۶۶	۱۴۵۲	-	*فرمان باز شدن خط*
	با وجود راکتور	۶۵	۱۰۹۲	۲۰۳۴	-	*فرمان باز شدن خط*
با مقاومت وصل کلید	بدون وجود راکتور	۶۵	۷۶۶	۶۰۷	۸۲	*فرمان وصل مجدد*
	با وجود راکتور	۶۵	۱۰۹۲	۸۲۳	۱۰۷	*فرمان وصل مجدد*

UNCORRECTED PROOF

جدول ۳- عملکرد الگوریتم پیشنهادی پس از باز شدن فاز معیوب در خط مورد مطالعه ناشی از وقوع خطای گذرا

شرایط آزمایش		t_{GO} [msec]	$V_D(max)$ [kV]	$V_{RE}(max)$ [kV]	t_{vr} [msec]	نتیجه عملکرد الگوریتم پیشنهادی
بدون مقاومت وصل کلید	بدون وجود راکتور	۳۲۵	۴۱۵	۹۳۶	۳۷۰	*فرمان وصل مجدد*
	با وجود راکتور	۳۰۵	۶۵۰	۱۲۸۰	-	*فرمان باز شدن خط*
با مقاومت وصل کلید	بدون وجود راکتور	۳۲۵	۴۱۵	۴۸۲	۳۴۳	*فرمان وصل مجدد*
	با وجود راکتور	۳۰۵	۶۵۰	۵۶۵	۳۵۷	*فرمان وصل مجدد*

جدول ۴- مقایسه الگوریتم پیشنهادی این پژوهش با سایر مراجع

مرجع	پیچیدگی محاسبات	محاسبه دقیق آستانه	عملکرد صحیح در حضور راکتور	فرکانس نمونه‌برداری (kHZ)	حداکثر زمان تشخیص خاموشی قوس ثانویه (میلی‌ثانیه)	اثر نویز	بررسی شرایط وصل پس از اطمینان از خاموشی قوس ثانویه
[۴]	ساده	گزارش نشده	بله	۲	۲۰	خیر	انجام نشده
[۶]	متوسط	گزارش نشده	بله	۲.۲	۳۰	خیر	انجام نشده
[۷]	متوسط	گزارش نشده	بله	۳۰-۵۰۰	۲۵	بله	انجام نشده
[۸]	متوسط	گزارش نشده	بله	۱/۶	۲۵/۴۵	خیر	انجام نشده
[۹]	ساده	گزارش نشده	گزارش نشده	گزارش نشده	۱۵	خیر	انجام نشده
[۱۰]	ساده	گزارش نشده	بله	۱	۲۳	خیر	انجام نشده
[۱۲]	متوسط	گزارش نشده	خیر	گزارش نشده	گزارش نشده	خیر	انجام نشده
[۱۵]	متوسط	گزارش نشده	بله	۲	۱۵	خیر	انجام نشده
[۲۰]	ساده	گزارش نشده	بله	۳/۸۴	گزارش نشده	خیر	انجام نشده
روش پیشنهادی حاضر	ساده	محاسبه‌شده	بله	۱	۱۰	خیر	لحاظ شده

۸-نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی توانایی تشخیص صحیح شرایط مناسب برای بازبست خطوط انتقال را پس از خاموشی قوس ثانویه دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها آشکار ساخت که این روش، افزون بر پیش‌بینی اضافه‌ولتاژهای گذرا، در مواجهه با شرایط گوناگون شبکه نیز از قابلیت و کارایی مطلوبی برخوردار است. نکته درخور توجه آن است که حضور یا عدم حضور راکتور جبران‌ساز تأثیری بر صحت عملکرد الگوریتم نداشته و در عین حال، به‌کارگیری مقاومت وصل کلید نقش بسزایی در کاهش اضافه‌ولتاژهای لحظه‌ای ایفا کرده است. سادگی و انعطاف‌پذیری این رویکرد سبب می‌شود که به‌راحتی در بستر سامانه‌های حفاظتی موجود قابل پیاده‌سازی و بهره‌برداری باشد.

در مجموع، روش پیشنهادی نه‌تنها گامی مؤثر در بهبود قابلیت اطمینان عملیات بازبست و کاستن از خاموشی‌های ناخواسته است، بلکه زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در توسعه الگوریتم‌های کارآمد در عرصه حفاظت شبکه‌های انتقال قدرت خواهد بود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

فرید کامل: نگارش نسخه اولیه، نرم افزار و متدولوژی.

محمد میرزایی: راهنمایی، بررسی نگارش و ویرایش

مجید شهابی: مفهوم‌سازی، مدیریت و بررسی نگارش و ویرایش

نبی‌الله رمضانی: بازبینی، بررسی نگارش و ویرایش

منابع مالی

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

هیچ منبع مالی توسط نویسندگان مورد استفاده قرار نگرفته است.

مراجع

[1] I. M. Dudurych, T. Gallagher, and E. Rosolowski, "Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 854–860, 2004.

[2] A. Johns, R. Aggarwal, and Y. Song, "Improved techniques for modelling fault arcs an faulted EHV transmission systems," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, no. 2, pp. 148–154, 1994.

[3] M. Nagpal, S.-H. Manuel, B. E. Bell, R. P. Barone, C. Henville, and D. Ghangass, "Field verification of secondary arc extinction logic," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1864–1872, 2015.

[4] X. Luo, C. Huang, and Y. Jiang, "Improved digital algorithm for adaptive reclosing for transmission lines with shunt reactors," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2066–2070, 2016.

[5] A. R. Adly, R. A. El Sehiemy, and A. Y. Abdelaziz, "An optimal/adaptive reclosing technique for transient stability enhancement under single pole tripping," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 348–358, 2017.

[6] I. Nikoofekr and J. Sadeh, "Determining secondary arc extinction time for single-pole auto-reclosing based on harmonic signatures," *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 211–225, 2018.

[7] R. J. Hamidi and H. Livani, "Adaptive single-phase auto-reclosing method using power line carrier signals," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96, pp. 64–73, 2018.

[8] W. A. Khan, B. Rehman, A. u. Rehman, M. Nasir, and M. I. Abid, "A continuous wavelet and fast fourier transform-based single-phase adaptive auto-reclosing scheme for ehv transmission lines," *Electrical Engineering*, vol. 105, no. 3, pp. 1347–1361, 2023.

[9] S. Jamali and A. Parham, "New approach to adaptive single pole auto-reclosing of power transmission lines," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 4, no. 1, pp. 115–122, 2010.

[10] M. Khodadadi, M. R. Noori, and S. M. Shahrtash, "A noncommunication adaptive single-pole autoreclosure scheme based on the ACUSUM algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2526–2533, 2013.

[11] H. Khorashadi-Zadeh and Z. Li, "Design of a novel phasor measurement unit-based transmission line auto reclosing scheme," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 8, pp. 806–813, 2011.

[12] M. D. Zadeh, I. Voloh, M. Kanabar, and Y. Xue, "An adaptive HV transmission lines reclosing based on voltage pattern in the complex plane," in *2012 65th annual conference for protective relay engineers*, 2012: IEEE, pp. 85–95.

[13] J. Morales, E. Muñoz, E. Orduña, and G. Idarraga-Ospina, "A novel approach to arcing faults characterization using multivariable analysis and support vector machine," *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2126, 2019.

[14] K. Dantas, F. Lopes, K. Silva, F. Costa, N. Ribeiro, and L. Gama, "Leveraging existing relays to improve single phase auto-reclosing," *Electric Power Systems Research*, vol. 212, p. 108457, 2022.

[15] S.-A. Ahmadi, M. Sanaye-Pasand, P. Jafarian, and H. Mehrjerdi, "Adaptive single-phase auto-reclosing approach for shunt compensated transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 3, pp. 1360–1369, 2020.

[16] N. I. Elkalashy, H. A. Darwish, A.-M. I. Taalab, and M. A. Izzularab, "An adaptive single pole autoreclosure based on zero sequence power," *Electric power systems research*, vol. 77, no. 5-6, pp. 438–446, 2007.

[17] H. Abniki and S. Nateghi, "High speed adaptive auto reclosing of 765 kV transmission lines," in *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012: IEEE, pp. 18–23.

[18] Y. Liu *et al.*, "A novel phasor-based adaptive single-phase auto-reclosing scheme for transmission lines with shunt reactors," *Electrical Engineering*, vol. 106, no. 6, pp. 7231–7245, 2024.

UNCORRECTED PROOF

[19] K. Makhmudov, T. Krasilnikova, A. Ghulomzoda, S. Beryozkina, M. Safaraliev, and I. Zicmane, "Improvement of adaptive single-phase automatic reclosing in extra-high voltage lines," in *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 2022: IEEE, pp. 468–471.
[20] S.-P. Ahn, C.-H. Kim, R. K. Aggarwal, and A. T. Johns, "An alternative approach to adaptive single pole auto-reclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 676–686, 2001.
[21] A. Guzman, J. Mooney, G. Benmouyal, N. Fischer, and B. Kasztenny, "Transmission line protection system for increasing power system requirements," in *2010 Modern Electric Power Systems*, 2010: IEEE, pp. 1–11.
[22] M. Ramold, G. Idarraga, and J. Jager, "Transient shunt reactor dimensioning for bulk power transmission systems during normal and faulty network conditions," in *2006 International Conference on Power System Technology*, 2006: IEEE, pp. 1–6.
[23] L. Rácz, "Transient Stability improvement of EHV power transmissions by adaptive single-pole reclosing," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering (Archives)*, vol. 29, no. 1, pp. 3–12, 1985.
[24] Q. Sun, J. Yin, F. Wang, J. Yan, Q. Li, and S. Chen, "Influence of grading capacitor of multiple-break circuit breaker on the extinction of secondary arc–a new method for reducing dead time," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 8, pp. 1954–1965, 2017.
[25] J. D. Glover, T. J. Overbye, and M. S. Sarma, *Power system analysis & design*. Cengage Learning, 2017.

UNCORRECTED PROOF