

الگوریتمی جهت آشکارسازی خطا در خطوط انتقال HVDC

مهدی اخباری^۱، استادیار؛ حامد سوری^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - akhbari@shahed.ac.ir

۲- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - h.soori8970@gmail.com

چکیده: در این مقاله با استفاده از مشخصه‌ی گذرای مؤلفه‌ی خطای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده در یک طرف خط انتقال، الگوریتمی برای آشکارسازی خطا در خطوط HVDC پیشنهاد شده‌است. در الگوریتم پیشنهادی، هنگامی که واحد شروع عملکرد حفاظت در سیستم حفاظت وجود خطایی را تایید کند، الگوریتم آشکارساز خطا از میزان همبستگی سیگنال‌های ولتاژ و جریان خطا برای تعیین جهت خطا استفاده می‌کند، سپس با استفاده از مولفه هارمونیکی فرکانس بالای جریان خطا، وجود خطا در زون حفاظتی تشخیص داده می‌شود. در انتها، با حذف کوپلینگ بین جریان‌های قطب مثبت و منفی خط انتقال، قطب دارای خطا از قطب سالم در سیستم دوقطبی تمایز داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطاها گویای صحت عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا، آشکارسازی خطا، حفاظت سیستم قدرت، ضریب همبستگی.

An Algorithm for Fault Detection in HVDC Transmission Lines

M. Akhbari¹, Assistant Professor; H. Soori², MSc Student

1- Electrical and Electronic Engineering Department, Shahed University, Tehran, Iran, Email: akhbari@shahed.ac.ir

2- Electrical and Electronic Engineering Department, Shahed University, Tehran, Iran, Email: h.soori8970@gmail.com

Abstract: In this paper, an algorithm is proposed for fault detection in HVDC lines using transient characteristic of the fault component of voltage and current measured on one side of the transmission line. In the proposed algorithm, when the starting unit of the protection system confirms the occurrence of fault, the fault voltage, and current correlation level is used to determine the fault direction and then by using high-frequency harmonic component of the fault current the fault is detected in the protective zone. Finally, by removing the coupling between the currents of positive and negative poles the faulted line is distinguished from a healthy line in the DC bipolar system. The simulation results for a variety of faults verify the validity of the proposed method.

Keywords: High voltage direct current transmission lines, fault detection, power system protection, correlation coefficient.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۵، ۱۳۹۶/۰۷/۳۰ و ۱۳۹۶/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

نام نویسنده مسئول: مهدی اخباری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - بزرگراه خلیج فارس - دانشگاه شاهد - دانشکده فنی مهندسی.

۱- مقدمه

شده است، لذا نسبت به تداخل صاعقه حساس می‌باشد [۱]. در [۴] یک طرح حفاظت پایلوت بر مبنای مشخصات جریان مؤلفه‌ی خطا پیشنهاد شده است. در این مرجع، به علت نیاز ارسال اطلاعات به طرف دیگر خط انتقال، کاهش سرعت در آشکارسازی خطا را به همراه دارد. به علاوه در این روش، اثر تداخل صاعقه بر عملکرد حفاظت بررسی و مطالعه نشده است. یک روش حفاظت جدید مبتنی بر امواج سیار برای خطوط انتقال UHVDC در [۵] ارائه شده است. در این روش، از مشخصه‌ی متفاوت امواج سیار پسرور در هنگام خطاهای داخل و خارج از خط انتقال و نیز پلاریته‌ی ولتاژ مؤلفه‌ی خطا برای تشخیص خطا استفاده شده است. در [۶]، یک طرح حفاظت پشتیبان جدید مبتنی بر دیفرانسیل جریان برای خطوط انتقال HVDC پیشنهاد شده که معایب حفاظت دیفرانسیل موجود را برطرف نموده است. یک روش حفاظت پشتیبان جدیدی برای خطوط انتقال UHVDC، بر مبنای تفاوت امیدانس گذرای اندازه‌گیری شده در هنگام وقوع خطا در داخل و خارج از خط انتقال DC، ارائه شده است [۷].

در این مقاله، با توجه به مشخصه‌ی گذرای ولتاژ و جریان خطا در یک طرف خط انتقال، روشی برای آشکارسازی خطا در خطوط HVDC پیشنهاد شده است. در این روش از مفاهیم گرایان جریان و ضریب همبستگی برای تشخیص خطا استفاده شده است. لازم به ذکر است، روش پیشنهاد شده از اطلاعات یک طرف خط انتقال برای تشخیص خطا استفاده می‌نماید. در این روش، با برقراری رابطه‌ی شروع عملکرد سیستم حفاظت، از میزان شباهت سیگنال‌های ولتاژ و جریان خطا برای تعیین جهت مثبت خطا استفاده شده است. با استفاده از مشخصه‌ی هارمونیک فرکانس‌های بالا در سیگنال جریان خطا، وجود خطا در زون حفاظتی شناسایی شده است. در نهایت، با حذف اثر کوپلینگ بین جریان‌های قطب مثبت و منفی، قطب دارای خطا از قطب سالم در سیستم دوقطبی تشخیص داده شده است.

در ادامه قسمت‌های بعدی مقاله، به ترتیب، عبارتند از: پس از این مقدمه، ابتدا به تشریح تئوری حفاظت پیشنهادی و معیارهای سیستم حفاظت پرداخته شده است، سپس نتایج شبیه‌سازی انواع خطاها و عملکرد سیستم حفاظت برای هر کدام آورده شده و مورد بحث قرار گرفته است. پس از آن مقایسه‌ای با روش‌های حفاظت موجود انجام شده و در انتها نتیجه‌گیری آمده است.

۲- استراتژی پیشنهادی حفاظت

شکل ۱، یک سیستم HVDC دوقطبی با ساختار مبدل منبع جریان را نمایش می‌دهد. مشخصات و پارامترهای این سیستم، در مرجع [۸] و پیوست ارائه شده است. در شکل ۱، F_x ، F_B و F_A و F_r و F_l به ترتیب، بیانگر وقوع خطا در قطب مثبت سیستم، خطا در بین راکتور صافی و مبدل و خطا در قسمت‌های AC سیستم است.

سیستم‌های انتقال HVDC^۱ به دلیل کم‌هزینه‌تر بودن آن‌ها برای مسافت‌های طولانی و قابلیت انتقال توان بیشتر آن‌ها، به طور گسترده ای برای پروژه‌های انتقال توان با خطوط انتقال هوایی، توان انبوه و اتصالات آسنکرون به کار برده شده است. مسائلی مثل مسافت طولانی‌تر خطوط، محیط‌های عبور خطوط انتقال و شرایط نامطلوب آب و هوایی در خطوط انتقال HVDC باعث شده است که نرخ خطا در آنها بالا باشد [۱]. بر اساس پژوهش آماری روی قطع برق سیستم‌های انتقال HVDC در کشور چین، تعداد کل قطعی برق از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ میلادی (ناشی از مجموعه دوقطبی، تک قطبی)، ۱۱۴ عدد است که ۳۶/۸٪ از این تعداد، به علت خطاهای خط انتقال بوده است. لذا اگر خطایی به طور صحیح شناسایی یا رفع نشود، ممکن است که باعث آسیب گسترده یا خاموشی وسیع در سیستم قدرت شود [۱].

در حال حاضر، حفاظت مبتنی بر موج سیار و حفاظت بر مبنای مشتق ولتاژ معمولاً به عنوان حفاظت اصلی و حفاظت‌های دیفرانسیل جریان و کاهش ولتاژ DC به عنوان حفاظت‌های پشتیبان برای خطوط انتقال HVDC استفاده می‌شوند. به علت اینکه حفاظت‌های مبتنی بر موج سیار و مشتق ولتاژ از نرخ تغییر ولتاژ برای آشکارسازی خطا استفاده می‌کنند، نسبت به مقاومت خطا حساس بوده و در آشکارسازی خطاهای امیدانس بالا دچار تشخیص اشتباه می‌شوند. همچنین، حفاظت دیفرانسیل جریان، به علت جریانات شارژ و دشارژ خط انتقال، عملکرد نسبتاً کندی داشته و حفاظت مبتنی بر کاهش ولتاژ DC قابلیت اعتماد پایینی در تشخیص خطاهای داخل زون حفاظتی و خارج از آن دارد [۱]. لذا، توسعه و ایجاد طرح‌های حفاظتی جدید با عملکرد بهتر، برای خطوط انتقال HVDC ضروری است.

طرح حفاظت جدیدی برای خطوط انتقال HVDC در [۱] ارائه شده است. این روش از مشخصه مقدار مؤثر جریان هارمونیک دوازدهم (فرکانس ۶۰۰ هرتز) در ترمینال خط در مدت گذراهای خطا، استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که در این روش کاهش فرکانس نمونه برداری، دقت استخراج نوسان مقدار مؤثر جریان را پایین می‌آورد. در مرجع [۲]، با تجزیه و تحلیل تابع تبدیل فیلتر DC، مشخص شده است که ولتاژ اندازه‌گیری شده، زمانی که خطاهای داخل و خارج از زون حفاظتی خط رخ می‌دهند، متفاوت می‌باشند. در خطاهای مقاومت پایین ولتاژ محل خطا نسبتاً کوچک خواهد بود، لذا ممکن است مقدار ولتاژ از مقدار تنظیمی برای عملکرد حفاظت کمتر باشد و حفاظت دچار مشکل شود. در مرجع [۳] بیان شده است به دلیل وجود واحد فیلتر-راکتور، اندازه امیدانس ورودی در فرکانس‌های بالا، زمانی که خطای داخل زون حفاظتی رخ دهد نسبت به زمانی که خطای خارجی رخ می‌دهد، کاملاً متفاوت است. بر این اساس، خطاهای داخل زون حفاظتی تنها با استفاده از اندازه‌گیری جریان یک طرف خطا، تشخیص داده شده‌اند. در این روش از اثرات گذرا بر خط انتقال (مثل اثر صاعقه) چشم‌پوشی

$$R_{xy} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t)dt} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t)dt} \quad (4)$$

رابطه‌ی ضریب همبستگی در حالت گسسته به صورت رابطه‌ی (۵) قابل ارائه است [۱۱].

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^N x(k)y(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N x^2(k)} \sqrt{\sum_{k=1}^N y^2(k)}} \quad (5)$$

در (۵)، N بیانگر تعداد نقاط نمونه‌برداری شده در پنجره‌ی زمانی است. ضریب همبستگی را می‌توان یک پارامتر آماری دانست که نشان می‌دهد تا چه حد دو یا چند متغیر با هم تغییر می‌کنند. همبستگی مثبت میان دو متغیر نشان می‌دهد که تا چه حد آن متغیرها با هم هم‌زمان افزایش یا کاهش می‌یابند؛ و همبستگی منفی نشان می‌دهد که تا چه اندازه یکی از متغیرها در حال افزایش و متغیر دیگر در حال کاهش می‌باشد. در این مقاله، از مفهوم ضریب همبستگی در واحدهای تشخیص جهت خطا و خط دارای خطا استفاده شده است.

۲-۲- واحد شروع حفاظت

با وقوع خطا در سیستم HVDC، تغییراتی در سیگنال‌های ولتاژ و جریان رخ خواهد داد. با توجه به این تغییرات، معیاری برای شروع عملکرد سیستم حفاظتی پیشنهاد شده است. برای شروع عملکرد سیستم حفاظت در هنگامی که خطا در سیستم HVDC رخ می‌دهد، از گرادیان جریان استفاده شده است. گرادیان جریان، به صورت رابطه‌ی (۶) تعریف می‌شود.

$$\nabla i(k) = \sum_{j=0}^2 i(k-j) - \sum_{j=3}^5 i(k-j) \quad (6)$$

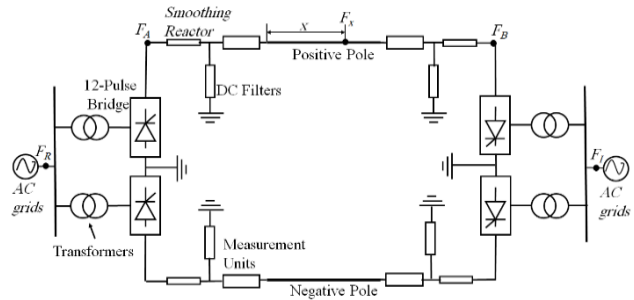
در رابطه‌ی (۶)، نمونه‌ی $i(k-j)$ ، نمونه‌ی i جریان قبل از زمان حال است. رابطه‌ی (۷)، معیار شروع عملکرد سیستم حفاظت است با برقراری رابطه‌ی (۷) وقوع اختلال در سیستم HVDC شناسایی شده و عملکرد سیستم حفاظت خط DC آغاز خواهد شد.

$$|\nabla i(k)| > \nabla_{i,set} \quad (7)$$

$\nabla_{i,set}$ ، مقدار آستانه‌ی عملکرد می‌باشد. در واحد شروع حفاظت، از داده‌های جریان در یک پنجره زمانی به طول 0.3 میلی ثانیه استفاده می‌شود.

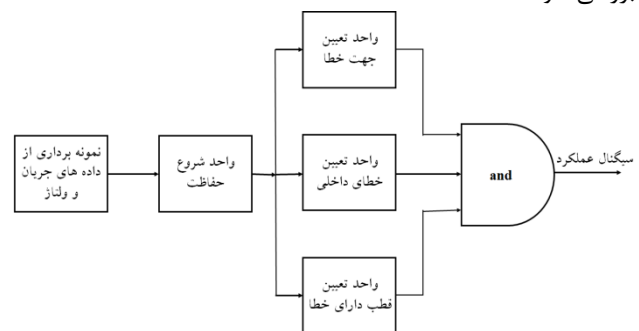
۲-۳- واحد تشخیص جهت خطا

هنگامی که یک خطا در مقابل عناصر اندازه‌گیری رخ می‌دهد، جهت تغییر ولتاژ و جریان مؤلفه‌ی خطا مخالف یکدیگر می‌باشد و لذا ضریب



شکل ۱: سیستم دو قطبی [۱].

شکل ۲، دیگرام بلوکی حفاظت پیشنهاد شده را نمایش می‌دهد. حفاظت پیشنهادی دارای چهار بلوک محاسباتی برای تشخیص خطا است. محاسبات مربوط به واحد شروع حفاظت با استفاده از یک پنجره زمانی، در هر لحظه انجام می‌شود. با برقرار شدن معیار شروع حفاظت، نمونه‌برداری از سیگنال‌های جریان و ولتاژ در یک پنجره زمانی ۳ میلی ثانیه‌ای آغاز خواهد شد. سپس با انجام محاسبات مربوط به هر یک از واحدهای سیستم حفاظتی، نتیجه عملکرد سیستم حفاظت مشخص خواهد شد. در بخش‌های بعد، عملکرد هر یک از بلوک‌های شکل ۲ بررسی خواهد شد.



شکل ۲: دیگرام بلوکی حفاظت پیشنهادی.

۲-۱- تحلیل همبستگی

تحلیل همبستگی یکی از اصول تئوری پردازش سیگنال است و به صورت گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف استفاده شده است [۹]. این تکنیک برای توصیف ارتباط و شباهت بین دو یا چند متغیر استفاده می‌شود [۱۰]. از این روش در حفاظت امواج سیار و مکان‌یابی خطا در حوزه‌ی حفاظت سیستم‌های قدرت استفاده شده است [۹]. جهت نمایش میزان همبستگی، می‌توان از ضریب همبستگی استفاده نمود. ضریب همبستگی پارامتری بدون دیمانسیون بوده و مقدار آن عددی در بازه‌ی $[-1, +1]$ است [۱۰].

ضریب همبستگی بین دو متغیر با استفاده از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید [۹].

$$\rho_{xy} = \frac{R_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

که در آن x و y دو متغیری هستند که همبستگی بین آن‌ها محاسبه می‌شود و می‌توان نوشت:

۲-۵- واحد تعیین خط دارای خطا

به علت کوپلینگ الکترومغناطیسی بین قطب مثبت و قطب منفی خط انتقال، ممکن است در تشخیص خط دارای خطا از خط سالم، اشتباه صورت گیرد. لذا، لازم است خط دارای خطا به درستی شناسایی شود [۱۲]. برای حذف اثر کوپلینگ، از ماتریس تبدیل مد فازی استفاده شده است [۱۳]. ورودی‌های این تبدیل جریان‌های دو قطب (یا ولتاژهای دو قطب) و خروجی‌های آن، مؤلفه‌های مد صفر^۲ و مد هوایی^۴ می‌باشد. ماتریس تبدیل برای حذف اثرات کوپلینگ بین جریانات دو قطب، به صورت (۱۲) می‌باشد [۱۳].

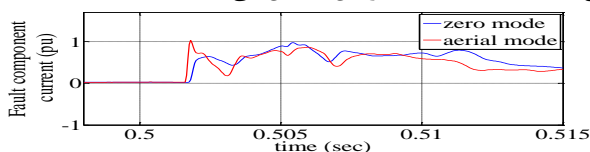
$$\begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_+ \\ m_- \end{bmatrix} \quad (12)$$

در رابطه‌ی (۱۲)، m_0 و m_1 ، به ترتیب، مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی، m_+ و m_- ، به ترتیب، مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده در قطب مثبت و قطب منفی هستند. با اندازه‌گیری مؤلفه‌های جریان خطا در دو قطب، روابط (۱۳) و (۱۴) به دست خواهد آمد [۱۳]. لازم به ذکر است که جریان مؤلفه‌ی خطا با تفریق جریان حالت ماندگار از جریان خطا به دست خواهد آمد.

$$\begin{cases} \Delta i_{0+}(k) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\Delta i_+(k) + \Delta i_-(k)) \\ \Delta i_{1+}(k) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\Delta i_+(k) - \Delta i_-(k)) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{0-}(k) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\Delta i_-(k) + \Delta i_+(k)) \\ \Delta i_{1-}(k) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\Delta i_-(k) - \Delta i_+(k)) \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، $\Delta i_{0+}(k)$ و $\Delta i_{1+}(k)$ ، به ترتیب، مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی جریان خطا در قطب مثبت، $\Delta i_+(k)$ و $\Delta i_-(k)$ ، به ترتیب، مؤلفه‌های جریان خطا در قطب مثبت و منفی می‌باشند. در رابطه‌ی (۱۴)، $\Delta i_{0-}(k)$ و $\Delta i_{1-}(k)$ ، به ترتیب، مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی جریان خطا در قطب منفی می‌باشند. توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) و نحوه تغییر جریان خطا در خطوط انتقال، هنگام وقوع خطای قطب به زمین، مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی در خط دارای خطا دارای پلاریته‌ی یکسان و در خط بدون خطا دارای پلاریته‌ی معکوس می‌باشند. در هنگام وقوع خطای قطب به قطب، مؤلفه‌ی مد صفر در هر دو خط انتقال تقریباً برابر با صفر می‌باشد [۱۳]. شکل‌های ۳ و ۴، شکل موج‌های مد صفر و مد هوایی در قطب مثبت و منفی را در هنگام وقوع خطای قطب مثبت به زمین نمایش می‌دهند.



شکل ۳: مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی قطب مثبت در هنگام وقوع خطای قطب مثبت به زمین.

همبستگی بین آن‌ها عددی منفی خواهد بود. اما هنگام وقوع خطا در پشت عناصر اندازه‌گیری، جهت تغییر ولتاژ و جریان مؤلفه‌ی خطا موافق یکدیگر می‌باشد و ضریب همبستگی بین آنها عددی مثبت خواهد بود. بر همین اساس، از رابطه‌ی (۸) برای تعیین جهت مثبت خطا استفاده می‌شود.

$$\rho_{vi} < \rho_{set1} \quad (8)$$

$$\rho_{set1} = -0.7 \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۸)، ρ_{vi} برابر با ضریب همبستگی بین ولتاژ و جریان در یک طرف خط انتقال و ρ_{set1} مقدار آستانه‌ی عملکرد است که برای تعیین آن باید در یک شبکه مشخص تعداد زیادی شبیه‌سازی به‌ویژه در شرایط حدی برای پارامترهای اثر گذار در شرایط خطا، انجام شود. هنگامی که رابطه‌ی (۹) برقرار شود، سیگنالی مبنی بر تشخیص جهت مثبت خطا ایجاد خواهد شد. لازم به ذکر است که جهت مثبت خطا به معنای وقوع خطا در مقابل عناصر اندازه‌گیری می‌باشد.

۲-۴- واحد تعیین خطای داخل خط انتقال

برای جذب هارمونیک‌های ایجادشده توسط مبدل‌ها در هر سیستم HVDC، فیلترهای DC و راکتورهای صافی در ترمینال‌های خطوط انتقال مورد نیاز می‌باشند. لذا ترکیب فیلترهای DC و راکتورهای صافی به صورت یک مرز برای خط انتقال می‌باشد که مانع از ورود مؤلفه‌های هارمونیکی فرکانس بالا به خط انتقال می‌شوند. در واقع این ترکیب اثر میراکنندگی قابل توجهی بر هارمونیک‌های فرکانس بالا دارد [۱۲].

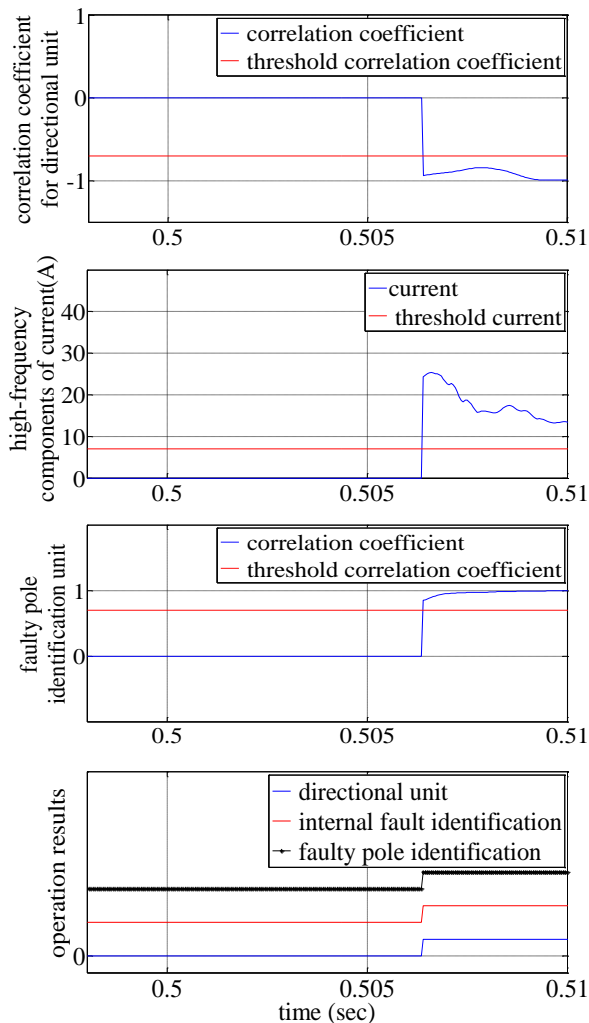
به علت خاصیت میراکنندگی فیلترهای DC و راکتورهای صافی، اگر یک خطا در خارج از خط انتقال رخ دهد، مؤلفه‌های هارمونیکی فرکانس بالا به سختی توسط عناصر اندازه‌گیری در خط انتقال قابل اندازه‌گیری خواهند بود. اما، اگر یک خطا در داخل خط انتقال رخ دهد، مؤلفه‌های هارمونیکی فرکانس بالا توسط عناصر اندازه‌گیری در خط انتقال اندازه‌گیری خواهند شد [۱۲]. با توجه به این مشخصه، وقوع خطا در داخل خط انتقال با استفاده از جریان‌های هارمونیکی فرکانس-بالا قابل تشخیص خواهد بود. از رابطه‌ی (۱۰) برای تعیین وقوع خطا در داخل خط انتقال استفاده شده است.

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |i_h(j)| > i_{h,set} \quad (10)$$

$$i_{h,set} = 0.0035 \text{ pu} \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۰)، $i_h(j)$ برابر با جریان‌های هارمونیکی فرکانس بالا، N برابر با تعداد نقاط نمونه‌برداری شده در پنجره‌ی زمانی است. در (۱۱)، $i_{h,set}$ برابر با مقدار آستانه‌ی تنظیمی است که از تعداد زیادی شبیه‌سازی در بدترین شرایط برای خطا با در نظر گرفتن یک فاصله اطمینان به دست آمده است. با استفاده از یک فیلتر میان‌گذر باترورث^۲ مرتبه‌ی هشتم، جریان‌های هارمونیکی در محدوده‌ی فرکانسی (1 kHz ~ 2 kHz)، استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

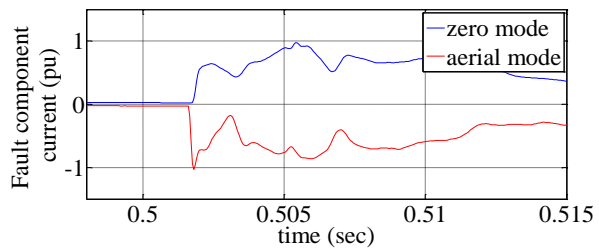
نموده‌است. اما به علت عدم برقراری معیار انتخاب خط دارای خطا، حفاظت قطب مثبت عمل نخواهد کرد.



شکل ۵: عملکرد سیستم حفاظت برای خطای قطب مثبت به زمین در فاصله‌ی ۱۰۰۰ km از ترمینال یکسوکننده با مقاومت خطای 250Ω .

۲-۲- خطاهای خارج از خط انتقال و زون حفاظتی

جهت نمایش عملکرد سیستم حفاظت پیشنهادی در خطاهای خارج از زون حفاظتی، یک خطا در خارج از خط انتقال در ترمینال اینورتر، در نقطه‌ی B، با مقاومت 0Ω اعمال شده‌است. نتایج شبیه‌سازی این خطا، در شکل ۷ نمایش داده شده‌است. در این خطا، پس از برقراری رابطه‌ی شروع حفاظت، با توجه به محل وقوع خطا، واحدهای تشخیص جهت خطا و قطب دارای خطا عمل نموده در حالی که واحد تشخیص خطای داخل خط انتقال عمل نخواهد کرد. لذا وقوع خطا در داخل خط انتقال اعلام نخواهد شد. همچنین نتایج شبیه‌سازی یک خطای سه‌فاز به زمین در قسمت ac ترمینال یکسوکننده با مقاومت 0Ω در شکل ۸ آورده شده‌است. پس از برقراری رابطه‌ی شروع حفاظت در این نوع خطا، با توجه به محل وقوع خطا، واحد تشخیص قطب دارای خطا عمل نموده در حالی که واحدهای تشخیص خطای داخل خط انتقال و تشخیص جهت خطا عمل نخواهد کرد. لذا وقوع خطا در داخل خط انتقال اعلام



شکل ۴: مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی قطب منفی در هنگام وقوع خطای قطب مثبت به زمین.

با توجه به پلاریته‌ی یکسان مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی در خط دارای خطا، ضریب همبستگی بین مؤلفه‌ی مد صفر و مد هوایی در هنگام خطای تک قطب به زمین، عددی مثبت خواهد بود. اما با توجه به پلاریته‌ی معکوس مؤلفه‌های مد صفر و مد هوایی در خط بدون خطا، ضریب همبستگی بین آن‌ها عددی منفی خواهد بود. بر مبنای تحلیل مذکور، خط دارای خطا توسط رابطه‌ی (۱۵) تعیین خواهد شد.

$$\rho_{i_{\phi_1}} > \rho_{set_2} \quad (15)$$

$$\rho_{set_2} = 0.7 \quad (16)$$

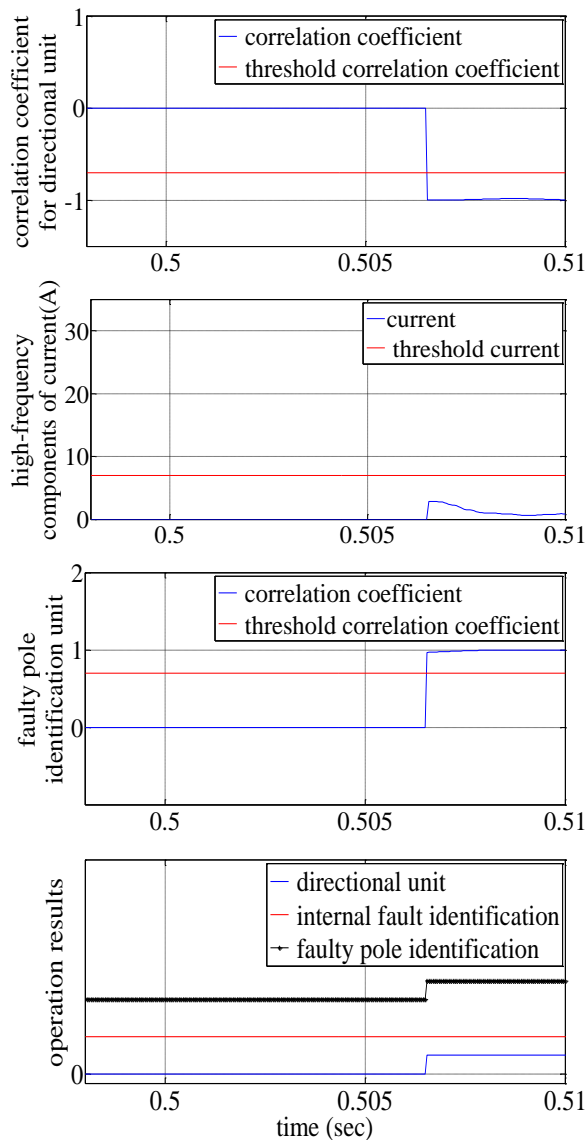
در رابطه‌ی (۱۵)، $\rho_{i_{\phi_1}}$ برابر با ضریب همبستگی بین مؤلفه‌ی مد صفر و مد هوایی جریان در خط انتقال DC و مقدار آستانه‌ی عملکرد است که از تعداد زیادی شبیه‌سازی در بدترین شرایط برای خطا با در نظر گرفتن یک فاصله اطمینان به دست آمده‌است. با برقراری رابطه‌ی (۱۵)، خط دارای خطا تعیین خواهد شد.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

یک سیستم دو قطبی 650 kV ، 2 kA (ظرفیت انتقال 6200 مگاوات) برای آزمون الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده‌است. پارامترهای این سیستم در مرجع [۸] داده شده‌است. از مدل وابسته به فرکانس برای خط انتقال استفاده شده و طول آن 1000 km است. نرم‌افزار PSCAD/EMTDC 4.5.0.0 برای شبیه‌سازی سیستم HVDC و نرم‌افزار MATLAB برای پیاده‌سازی الگوریتم حفاظت به کار گرفته شده‌است. زمان اعمال خطاها در لحظه‌ی 0.5 ثانیه و مدت زمان خطا 0.5 ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است، فرکانس نمونه‌برداری 20 kHz می‌باشد.

۳-۱- خطای روی خط انتقال (داخل زون حفاظتی)

نتایج حاصل از عملکرد سیستم حفاظت هنگام وقوع خطای قطب مثبت به زمین در فاصله‌ی 1000 km از ترمینال یکسوکننده با مقاومت خطای 250Ω در شکل ۵ آورده شده‌است. نتایج شکل ۵، گویای عملکرد صحیح سیستم حفاظت در هنگام وقوع خطا در انتهای خط انتقال می‌باشد. همچنین در شکل ۶، نتایج عملکرد سیستم حفاظت قطب مثبت در هنگام خطای قطب منفی به زمین در فاصله‌ی 1000 km از ترمینال یکسوکننده با مقاومت خطای 1Ω آورده شده‌است. با توجه به شکل ۶، سیستم حفاظت قطب مثبت شروع به کار

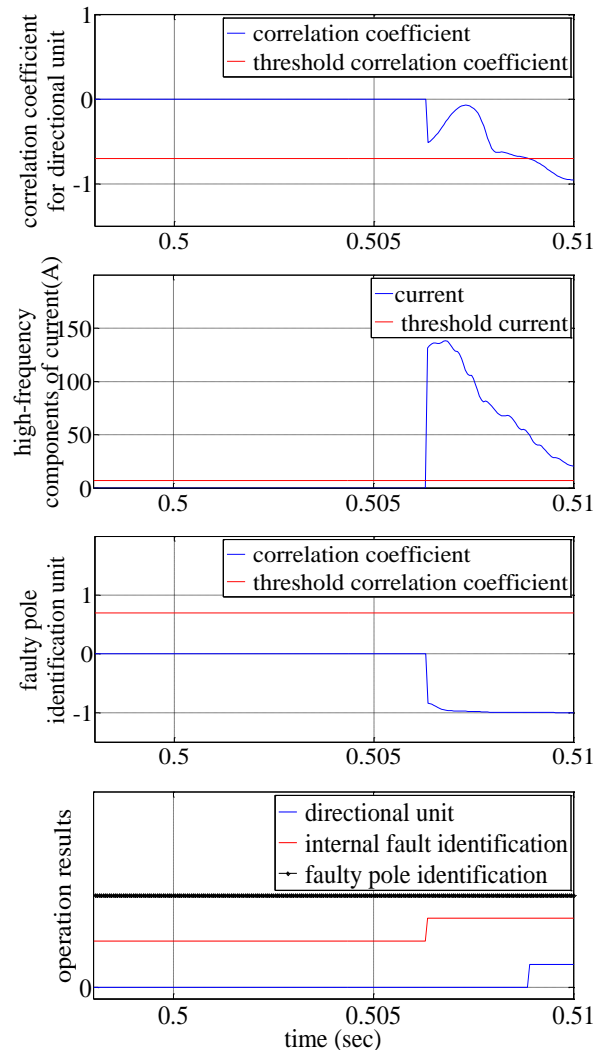


شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی خطا در خارج از خط انتقال؛ نقطه‌ی B در ترمینال اینورتر و با مقاومت Ω .

۳-۴- اثر مقاومت خطا

مقدار مقاومت بالای خطا ممکن است باعث عملکرد اشتباه سیستم حفاظت شود. در این قسمت، اثر مقاومت خطا بر عملکرد حفاظت پیشنهادی با اعمال خطاها با مقاومت متفاوت و در محل‌های مختلف خط انتقال DC، بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی اثر مقاومت خطا در جدول ۳ آورده شده است. نتایج این جدول، بیانگر قابلیت حفاظت پیشنهادی در آشکارسازی انواع خطاهای داخل خط انتقال تا مقاومت 500Ω می‌باشد.

نخواهد شد. نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطاهای خارج از خط انتقال و در محل‌های مختلف، در جدول ۱ آورده شده است. نتایج جدول ۱ بیانگر صحت عملکرد سیستم حفاظتی در خطاهای خارج از خط انتقال می‌باشد.



شکل ۶: عملکرد سیستم حفاظت قطب مثبت برای خطای قطب منفی به زمین در فاصله‌ی ۱۰۰۰ km از ترمینال یکسوکننده با مقاومت Ω .

۳-۳- اثر محل وقوع خطا

بررسی اثر محل وقوع خطا بر حفاظت پیشنهادی و صحت عملکرد آن، با اعمال خطا در محل‌های مختلف در خط انتقال DC، بررسی شده است. نتایج حاصل از آن، در جدول ۲ آورده شده است. نتایج جدول ۲، گویای صحت عملکرد حفاظت پیشنهادی در آشکارسازی خطا در محل‌های مختلف در داخل خط انتقال می‌باشد.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی انواع خطاها در خارج از خط انتقال HVDC.

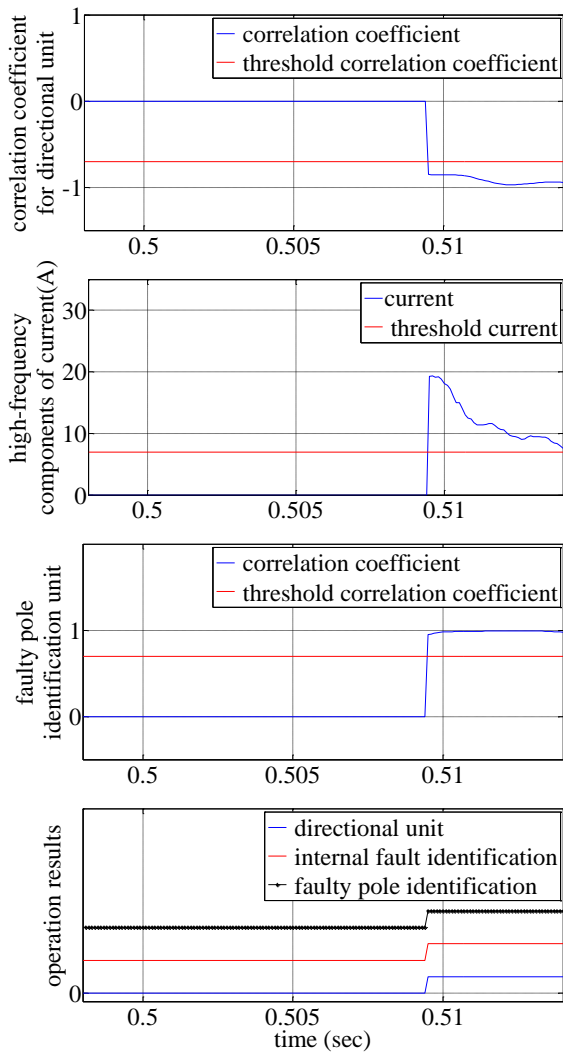
محل خطا ($R_f = 1 \Omega$)	نوع خطا	شروع حفاظت	معیار تشخیص جهت مثبت خطا	معیار تشخیص خطای داخل خط	معیار انتخاب خط دارای خطا	نتیجه‌ی عملکرد حفاظت
f_A	خطای زمین	√	×	×	√	×
f_B	خطای زمین	√	√	×	√	×
f_R	تک فاز به زمین	√	×	×	√	×
	دو فاز به هم	√	×	×	√	×
	دو فاز به زمین	√	×	×	√	×
	سه فاز به هم	√	×	×	√	×
f_I	تک فاز به زمین	√	√	×	√	×
	دو فاز به هم	√	√	×	√	×
	دو فاز زمین	√	√	×	√	×
	سه فاز به هم	√	√	×	√	×

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطاها در محل‌های مختلف در داخل زون حفاظتی.

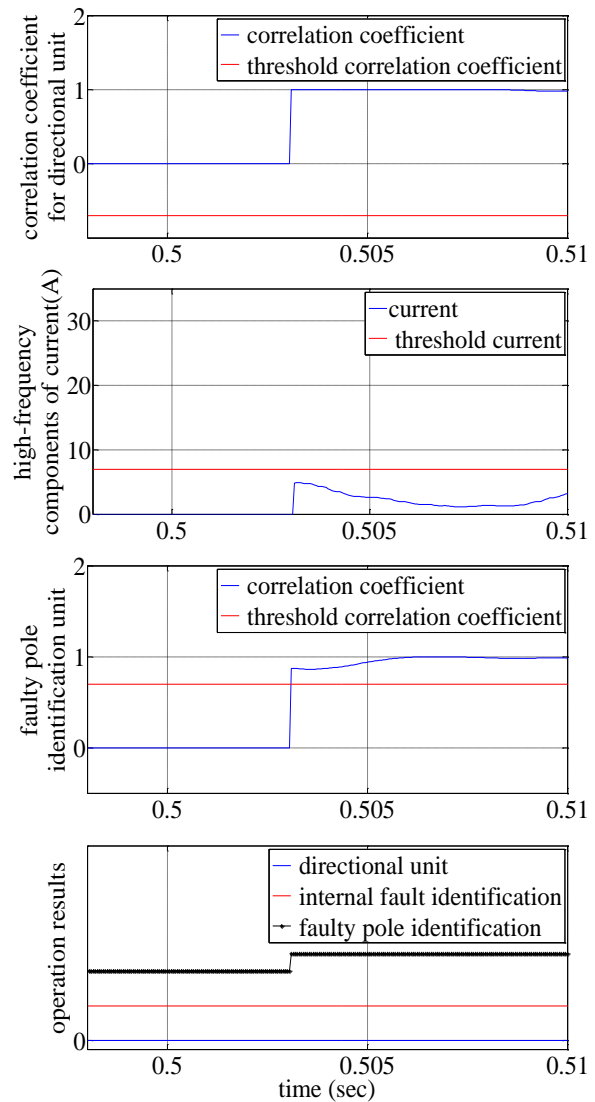
زون حفاظتی	محل خطا ($R_f = 50 \Omega$)	شروع حفاظت	معیار تشخیص جهت مثبت خطا	معیار تشخیص خطای داخل خط	معیار انتخاب خط دارای خطا	نتیجه‌ی عملکرد حفاظت
خط انتقال شماره یک (قطب مثبت)	۱۰۰	√	√	√	√	√
	۳۰۰	√	√	√	√	√
	۵۰۰	√	√	√	√	√
	۷۰۰	√	√	√	√	√
	۹۰۰	√	√	√	√	√

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطاهای داخل خط انتقال با مقاومت‌های متفاوت.

زون حفاظتی	محل خطا (km)	مقاومت خطا (Ω)	شروع حفاظت	معیار تشخیص جهت مثبت خطا	معیار تشخیص خطای داخل خط	معیار انتخاب خط دارای خطا	نتیجه‌ی عملکرد حفاظت
خط انتقال شماره یک (قطب مثبت)	۰	۱	√	√	√	√	√
		۵۰	√	√	√	√	√
		۱۵۰	√	√	√	√	√
		۲۵۰	√	√	√	√	√
		۵۰۰	√	√	√	√	√
	۵۰۰	۱	√	√	√	√	√
		۵۰	√	√	√	√	√
		۱۵۰	√	√	√	√	√
		۲۵۰	√	√	√	√	√
		۵۰۰	√	√	√	√	√
	۱۰۰۰	۱	√	√	√	√	√
		۵۰	√	√	√	√	√
		۱۵۰	√	√	√	√	√
		۲۵۰	√	√	√	√	√
		۵۰۰	√	√	√	√	√



شکل ۹: نتایج عملکرد سیستم حفاظت در هنگام کاهش فرکانس نمونه برداری به میزان ۵۰ درصد.



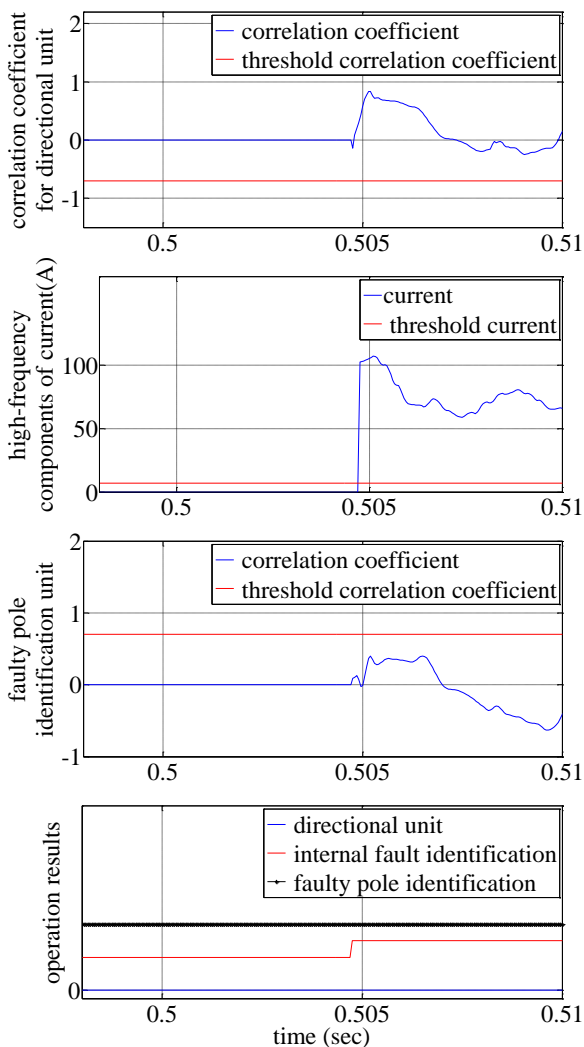
شکل ۸: نتایج شبیه سازی خطای سه فاز به زمین منبع ac در طرف یکسو کننده و با مقاومت 0.0Ω .

۳-۶- اثر تداخل صاعقه

اثر تداخل صاعقه بر عملکرد حفاظت پیشنهادی، با اعمال نمونه‌ای از جریان صاعقه با شکل موج نمایی (با مشخصه $1.2/50 \mu s$) در محل 500 km از قطب مثبت ترمینال یکسو کننده، انجام شده است [۱]. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب، اثر تداخل صاعقه بر جریان و ولتاژ خط انتقال و نتایج عملکرد سیستم حفاظت در تداخل صاعقه را نمایش می‌دهند. طبق نتایج شکل ۱۱، معیار شروع حفاظت برقرار شده است اما با توجه به نتیجه‌ی انجام محاسبات سایر واحدهای سیستم حفاظت خط انتقال HVDC، سیستم حفاظت در هنگام تداخل صاعقه عمل نخواهد کرد.

۳-۵- اثر فرکانس نمونه برداری

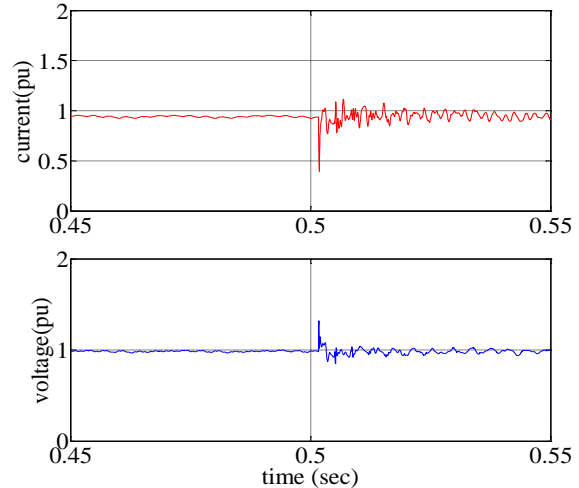
جهت بررسی اثر فرکانس نمونه برداری بر حفاظت پیشنهادی، فرکانس نمونه برداری از سیگنال‌های ولتاژ و جریان به نصف، یعنی 10 kHz کاهش داده شده است. نتایج شبیه سازی اعمال یک خطا در فاصله 1000 km (انتهای خط انتقال) از ترمینال یکسو کننده با مقاومت 0.0Ω ، در شکل ۹ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۹، سرعت تشخیص خطا اندکی کاهش می‌یابد، اما حفاظت پیشنهادی به درستی وقوع خطا را در داخل زون حفاظتی اعلام نموده است.



شکل ۱۱: اثر تداخل صاعقه بر عملکرد سیستم حفاظت پیشنهادی.

۴- نتیجه گیری

الگوریتم جدیدی جهت آشکارسازی خطا و حفاظت خطوط انتقال دوقطبی HVDC در این مقاله ارائه شد. در این روش از مفاهیم گرادبان جریان و ضریب همبستگی برای تشخیص خطا استفاده شده است. همچنین روش پیشنهادی از اطلاعات یک طرف خط انتقال برای تشخیص خطا استفاده می‌نماید و لذا نیاز به وجود کانال مخابراتی برای انتقال اطلاعات بین دو طرف خط انتقال ندارد. روش ارائه شده شامل چهار واحد مختلف شامل واحد شروع کننده، واحد تشخیص جهت خطا، واحد تشخیص زون خطا و واحد تعیین قطب تحت خطا در سیستم دوقطبی است. در الگوریتم پیشنهادی، با تأیید واحد تشخیص وقوع خطا یا واحد شروع عملکرد سیستم حفاظت، از میزان شباهت سیگنال‌های ولتاژ و جریان خطا برای تعیین جهت مثبت خطا استفاده شده است. با استفاده از مشخصه‌های هارمونیک فرکانس‌های بالا در سیگنال جریان خطا، وجود خطا در زون حفاظتی شناسایی شده و در نهایت، با حذف اثر کوپلینگ بین جریان‌های قطب مثبت و منفی، قطب دارای خطا از قطب سالم در سیستم دوقطبی تمیز داده شده است.



شکل ۱۰: اثر تداخل صاعقه بر شکل موج جریان و ولتاژ.

۳-۷- مقایسه با سایر روش‌ها

۳-۷-۱- حفاظت مبتنی بر امواج سیار و حفاظت مشتق ولتاژ

حفاظت‌های مبتنی بر امواج سیار و مشتق ولتاژ، از نرخ تغییر ولتاژ برای آشکارسازی خطا استفاده می‌کنند. مشکل اصلی این دو روش، وابستگی عملکرد آن‌ها به امپدانس حلقه‌ی خطا است. جداول ۱ و ۲، به ترتیب، مقادیر امپدانس بحرانی را در آشکارسازی خطا توسط روش‌های حفاظت امواج سیار و مشتق ولتاژ نمایش می‌دهند [۱]. مقایسه نتایج جدول ۳ با جداول ۴ و ۵، گویای توانایی عملکرد حفاظت پیشنهادی در آشکارسازی خطاها با مقاومت‌های بالاتر می‌باشد.

جدول ۴: مقادیر امپدانس بحرانی در روش حفاظت مبتنی بر امواج

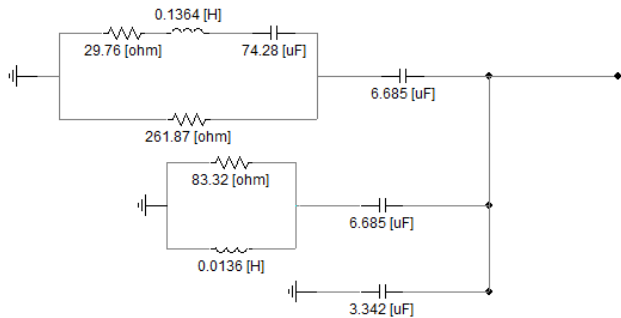
سیار [۱].

محل خطا	خط یکسوساز	نقطه میانی خط	خط اینورتر
امپدانس بحرانی (Ω)	۱۱۳	۲۵	۱۸
دلیل عدم عملکرد	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$

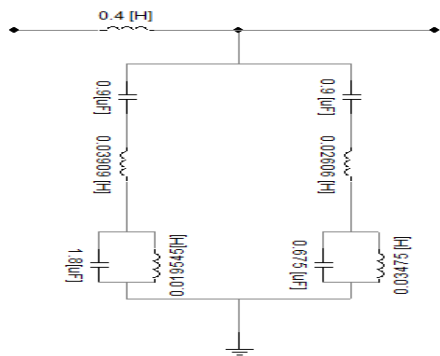
جدول ۵: مقادیر امپدانس بحرانی در روش حفاظت مشتق ولتاژ [۱].

محل خطا	خط یکسوساز	نقطه میانی خط	خط اینورتر
امپدانس بحرانی (Ω)	۷۰	۷۰	۱۸
دلیل عدم عملکرد	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$	عرض لبه افزایشی ناکافی از $\frac{\partial V}{\partial t}$

خطوط انتقال HVDC ارائه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های متعدد، گویای کارکرد صحیح و قابل اطمینان روش حفاظت پیشنهادی در تشخیص خطاهای خط انتقال از خطاهای خارج از خط و نیز تشخیص خط سالم از خط دارای خطا می‌باشد.



شکل ۱۴: فیلترهای AC در سیستم تحت مطالعه.

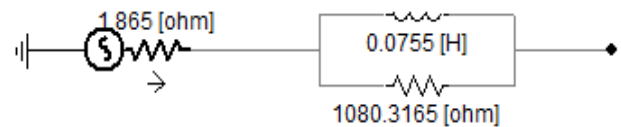


شکل ۱۵: راکتور صافی و فیلترهای DC در سیستم تحت مطالعه.

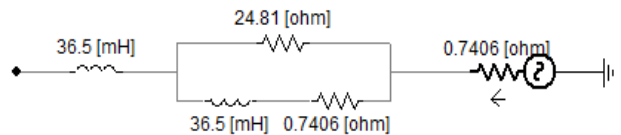
انواع خطاهای داخل و خارج از زون حفاظتی به‌روی یک سیستم تست استاندارد شبیه‌سازی شده و کارایی الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطا به‌روی داده‌های شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌علاوه، اثرات محل وقوع خطا، مقاومت خطا، فرکانس نمونه‌برداری و نیز تداخل صاعقه بر عملکرد روش پیشنهادی بررسی شده‌است. در قسمت مقایسه، مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های حفاظت موجود در

پیوست‌ها

پارامترهای سیستم HVDC شبیه‌سازی شده در این قسمت آمده‌است. الف) سیستم‌های AC: ولتاژ نامی برای سیستم AC در طرف یکسوکننده و طرف اینورتر، به‌ترتیب، برابر با ۵۲۵/۴۲۶ kV و ۴۳۰/۴۶۷۶ می‌باشد. معادل تونن سیستم‌های AC به‌صورت شکل‌های ۱۲ و ۱۳ است.



شکل ۱۲: معادل تونن سیستم AC طرف یکسوکننده.



شکل ۱۳: معادل تونن سیستم AC طرف اینورتر.

مراجع

- [1] Jian Liu, Nengling Tai, Chunju Fan, Wentao Huang, "Protection scheme for high-voltage direct-current transmission lines based on transient AC current," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 16, p. 2633–2643, 2015.
- [2] Shu-ping Gao, Xu Chu, Quan-yu Shen, Xing-fu Jin, Juan Luo, Ye-yi Yun, Guo-bing Song, "A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end voltage," Electrical Power and Energy Systems, vol. 65, pp. 262–270, 2015.
- [3] Guobing Song, Member, Xu Chu, Shuping Gao, Xiaoning Kang, Member and Zaibin Jiao, "A New Whole-Line Quick-Action Protection Principle for HVDC Transmission Lines Using One-End Current," IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 599 - 607, 2015.
- [4] Shuping Gao, Guobing Song, Zhibin Ma, Xingfu Jin, "Novel pilot protection principle for high-voltage direct current transmission lines based on fault component current characteristics," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 5, pp. 468–474, 2015.
- [5] Fei Kong, Zhiguo Hao and Baohui Zhang, "A Novel Traveling Wave Based Main Protection Scheme for ±800 kV UHVDC Bipolar Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, Iss. 5, pp. 2159 - 2168, 2016.
- [6] Fei Kong, Zhiguo Hao and Baohui Zhang, "A novel differential current protection scheme for CSC-HVDC transmission lines,"

(ب) ترانسفورماتورها: پارامترهای ترانسفورماتورهای موجود در طرف یکسوکننده و اینورتر در جدول ۶ آورده شده‌است.

(پ) فیلترهای AC: مقادیر فیلترهای AC در شکل ۱۴ آورده شده‌است.

(ت) راکتور صافی و فیلترهای DC: مقادیر راکتور صافی و فیلترهای DC در شکل ۱۵ داده شده‌است.

جدول ۶: پارامترهای ترانسفورماتورهای طرف یکسوکننده و اینورتر.

پارامتر	یکسوکننده		اینورتر	
نوع اتصال	ستاره / ستاره	مثلث / ستاره	ستاره / ستاره	ستاره / مثلث
قدرت (MVA)	۸۹۱	۸۹۱	۸۴۶	۸۴۶
نسبت ولتاژ (kV)	(۵۲۵) / (۲۰۹/۷)	(۵۲۵) / (۱۹۸/۹)	(۵۲۵) / (۱۹۸/۹)	(۱۹۸/۹) / (۵۲۵)
راکتانس نشی (/.)	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸

- [10] X. Jin, G. Song, "A Novel Pilot Protection for VSC-HVDC Transmission Lines Based on Correlation Analysis," *Energy and Power Engineering*, vol. 5, pp. 1182-1186, 2013.
- [11] Guobing Song, Chenqing Wang, Ting Wang, Mostafa Kheshti, Xiaoning Kang, "A Phase Selection Method for Wind Power Integration System Using Phase Voltage Waveform Correlation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 99, 2016.
- [12] Fei Kong, Zhiguo Hao, Song Zhang and Baohui Zhang, "Development of a Novel Protection Device for Bipolar HVDC Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 5, pp. 2270-2278, 2014.
- [13] Zhao Li, Guibin Zou, Bingbing Tong, Houlei Gao, Qian Feng, "Novel Traveling Wave Protection Method for High Voltage DC Transmission Line," *Power & Energy Society General Meeting, Denver, Colorado*, 2015.
- IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, Iss: 4, pp. 978-986, 2017.
- [7] J. Liu, N. Tai, Ch. Fan, Y. Yang, "Transient measured impedance based protection scheme for DC line faults in ultra high-voltage direct-current system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, Iss 14, pp. 3597 - 3609, 2016.
- [8] Sheng Lin, Shan Gao, Zhengyou He and Yujia Deng, "A Pilot Directional Protection for HVDC Transmission Line Based on Relative Entropy of Wavelet Energy," *Entropy*, vol. 17, pp. 5257-5273, 2015.
- [9] Xiang-Ning Lin, Menghua Zhao, Khafri Alymann, Pei Liu, "Novel Design of a Fast Phase Selector Using Correlation Analysis," *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1283-1290, 2005.

زیر نویس ها

³ zero mode

⁴ aerial mode

¹ High Voltage Direct Current

² butterworth