



Research Article

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2026) 5(2):1-13

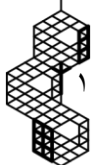
A Novel Method to Discriminate the Internal Fault from the External Fault in High Voltage Direct Current Network Using Current Symmetrical Components

Fateme Fallahi Meybodi¹, PhD Student, Ahmad Mirzaei¹, Associate Professor¹ Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract:

Considering the huge amount of transmitted power in high voltage direct current networks, protection of these networks against internal and external faults of the network is of particular importance. For the correct operation of protection equipment and prevention of DC pole block in AC faults, first the internal fault must be distinguished from the external fault of the network and then, according to the position of the fault, the appropriate protective function should be applied. Also, to increase reliability, backup protection is essential when the primary protection fails. In this paper, the current symmetrical components inside the converters are analyzed under various fault conditions in a high voltage direct current network and according to that, a new protection method is proposed, which can discriminate the internal fault from the external fault in the network by checking the negative component of the fault current on the rectifier or inverter side and comparing of the average value of the negative and zero components of the fault current. This single-ended method with low sampling rate doesn't need a communication line and along with differential protection can increase the reliability and speed of the backup protection system. The data of this paper are obtained by simulating a bipolar high voltage direct current transmission system with 12-pulse current source converter in PSCAD software based on the frequency-dependent line model. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Backup protection, Direct current high voltage network, Current source converter, Symmetrical components.

Received: 19 December 2024**Revised:** 30 January 2025**Accepted:** 19 February 2025**Corresponding Author:** Dr. Ahmad Mirzaei, mirzaei@yazd.ac.irDOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193996>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

یک روش جدید برای تشخیص خطای داخل از خارج در شبکه فشارقوی جریان مستقیم بر اساس مؤلفه‌های متقارن جریان

فاطمه فلاحی میبیدی^۱، دانشجوی دکتری، احمد میرزائی^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده: با توجه به حجم عظیم توان انتقالی در شبکه‌های فشار قوی جریان مستقیم، حفاظت این شبکه‌ها در مقابل خطاهای داخل و خارج از شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای عملکرد درست تجهیزات حفاظتی و جلوگیری از بلاک قطب DC در خطاهای AC، ابتدا باید خطای داخل از خطای خارج شبکه تشخیص داده شود و سپس با توجه به موقعیت خطا، عملکرد حفاظتی مناسب اعمال شود. همچنین برای افزایش قابلیت اطمینان، حفاظت پشتیبان در مواقعی که حفاظت اصلی دچار مشکل شود ضروری است. در این مقاله، مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدل‌ها تحت شرایط مختلف خطا در یک شبکه فشار قوی جریان مستقیم تحلیل می‌شوند و با توجه به آن، یک روش جدید حفاظتی پیشنهاد می‌شود که با بررسی مؤلفه منفی جریان خطا در سمت یکسوکننده یا معکوس‌کننده و مقایسه مقدار متوسط مؤلفه منفی و صفر جریان خطا، می‌تواند خطای داخل را از خطای خارج شبکه تشخیص دهد. این روش که از داده‌های یک طرف خط انتقال با نرخ نمونه‌برداری پایین استفاده می‌کند، نیاز به خط ارتباطی ندارد و می‌تواند در کنار حفاظت دیفرانسیل، قابلیت اطمینان و سرعت عملکرد سیستم حفاظتی پشتیبان را افزایش دهد. داده‌های این مقاله با شبیه‌سازی یک سیستم انتقال فشارقوی جریان مستقیم دو قطبی با مبدل منبع جریان دوازده پالسه در نرم‌افزار PSCAD و بر اساس مدل خط وابسته به فرکانس به دست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی، اثربخشی روش پیشنهادی را تأیید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: حفاظت پشتیبان، شبکه فشارقوی جریان مستقیم، مبدل منبع جریان، مؤلفه‌های متقارن.



تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد میرزائی، mirzaei@yazd.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193996>

نیاز روزافزون به انرژی‌های تجدیدپذیر^۱، منجر به اهمیت سیستم‌ها و تجهیزات مورد نیاز آن‌ها می‌شود. یکی از تجهیزات مورد استفاده در این سیستم‌ها مبدل‌های الکترونیک قدرت هستند که به عنوان ادوات واسطه، انرژی تولید شده را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهند [۱، ۲]. سیستم‌های تبدیل انرژی، وابسته به میزان توان تولیدی که دارند به نقاط مختلف شبکه اعم از فشار ضعیف، فشار متوسط و فشار قوی متصل می‌شوند [۳]. علاوه بر این برای توربین‌های بادی فراساحلی و مزارع بادی که دور از خطوط انتقال هستند استفاده از سیستم فشارقوی جریان مستقیم^۲ (HVDC) گزینه بسیار مناسبی جهت انتقال اقتصادی و مطمئن توان است [۴، ۵]. مسافتی که HVDC توان را انتقال می‌دهد، عموماً زیاد است و به ناچار مسیر انتقال، از زمین‌های ناهموار و شرایط آب و هوایی نامناسب عبور می‌کند که این امر می‌تواند سبب بروز خطاهای مکرر در خط انتقال DC شود [۶]. از آن‌جا که اندوکتانس سری در خطوط انتقال DC خیلی کم است، شدت خطای DC بالا است و اگر در مدت زمان مشخصی پاک نشود، می‌تواند سبب بلاک شدن قطب DC شود [۷، ۸]. با توجه به مقدار انرژی زیادی که توسط این خطوط، انتقال داده می‌شود، بلاک شدن قطب DC نقش بسزایی در عملکرد کل سیستم دارد [۹]. در نتیجه قابلیت اطمینان و امنیت سیستم DC نقش مهمی در امنیت و پایداری کل سیستم دارد و مسأله حفاظت DC از جمله مسائلی است که مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار می‌گیرد.

روش‌های حفاظتی که امروزه به صورت متداول در سیستم‌های DC به کار برده می‌شوند شامل حفاظت امواج سیار^۳ و تغییرات ولتاژ^۴ به عنوان حفاظت اصلی^۵ و حفاظت دیفرانسیل^۶ به عنوان حفاظت پشتیبان^۷ می‌باشند [۱۰]. حفاظت امواج سیار دارای سرعت عملکرد بالایی است و تحت تأثیر تنظیمات بار و جریان خازنی توزیع شده نیست اما در خطای با مقاومت بالا، قابلیت اطمینان خوبی ندارد و نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا دارد [۱۱، ۱۲]. حفاظت دیفرانسیل که دارای سرعت عملکرد کمتری است و نیاز به داده‌های دو طرف خط انتقال دارد، به عنوان حفاظت پشتیبان در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند خطاهای با مقاومت بالا را نیز تشخیص دهد و در برخی موارد در خطاهای با مقاومت بالا، حفاظت دیفرانسیل نقش حفاظت اصلی را دارد [۱۳، ۱۴].

با توجه به حساسیت تجهیزات HVDC لازم است که خطای DC از AC در مدت زمان محدودی تفکیک شده و در صورت لزوم حفاظت مناسب وارد عمل شود تا به تجهیزات آسیبی نرسد. هنگامی که خطای خارجی در سیستم AC اتفاق می‌افتد، جریان خازنی توزیع شده در طول خط منجر به ایجاد جریان دیفرانسیلی بالا می‌شود که مانع تشخیص خطای DC از AC در طول دوره گذرا می‌شود. این امر سبب تاخیر زیاد حفاظت دیفرانسیل می‌شود و در بعضی موارد این تأخیر بالا می‌تواند منجر به متوقف‌سازی سیستم DC شود [۱۵]. بنابراین حفاظت DC دارای چالش‌های بسیاری است که در نتیجه آن تحقیقات در این زمینه ادامه دارد.

روش حفاظت دیستانس برای خطوط HVDC، توانایی تخمین مکان دقیق خطا را دارد ولی در تشخیص خطاهای نزدیک به انتهای خط ممکن است دچار مشکل شود [۱۶، ۱۷]. روش‌های حفاظتی که براساس مؤلفه‌های گذرا^۸ عمل می‌کنند، از تفاوت انرژی بین پایانه‌های یکسوکننده و معکوس‌کننده برای تشخیص خطای داخل از خارج استفاده می‌کنند [۱۸، ۱۹]. این روش‌ها به داده‌های دو طرف خط انتقال نیاز دارند و ممکن است در شرایط گذرای مشابه، مثل سوئیچینگ، دقت کافی نداشته باشند.

در کنار روش‌های حفاظتی معمول، روش‌های حفاظتی دیگری نیز وجود دارند که به تشخیص خطای داخل از خارج شبکه کمک می‌کنند. یکی از این روش‌ها در نظر گرفتن جریان هارمونیک مشخصه^۹ است که هنگام خطا تولید می‌شود. از آن‌جا که هنگام وقوع خطای خارجی، جریان هارمونیک مشخصه توسط فیلتر DC و سلف هموارکننده محدود می‌شود، خطای داخلی، جریان هارمونیک مشخصه بیشتری تولید می‌کند و می‌توان از این پارامتر برای تشخیص خطای داخل از خارج استفاده شود [۲۰، ۲۱]. با توجه به حساس بودن جریان هارمونیک مشخصه نسبت به مقاومت خطا و مکان خطا، بهتر است از امپدانس هارمونیک مشخصه جهت تشخیص خطای داخل از خارج شبکه استفاده کرد که عیب‌های روش قبل را برطرف می‌کند [۱۰]. هم‌چنین استفاده از جریان‌های فرکانسی فیلتر DC، می‌تواند به جداسازی خطای داخل از خارج کمک کند [۷]. روش دیگر استفاده از جریان‌های مدال گذرا در فرکانس‌های پایین است که تغییر جهت این جریان‌ها با توجه به جریان شارژ خازنی در ابتدا و انتهای خط، به عنوان معیاری برای تشخیص خطای DC معرفی می‌شود [۱۴]. با توجه به این‌که جهت شارش توان راکتیو در سیستم HVDC، از سمت یکسوکننده به معکوس‌کننده است؛ تغییر جهت شارش انرژی راکتیو دو پایانه یکسوکننده و معکوس‌کننده نیز یکی از معیارهایی است که به تشخیص خطای داخل از خارج شبکه کمک می‌کند [۲۲]. در سال‌های اخیر روش‌های حفاظتی مختلفی بر مبنای امواج سیار یا گذرا با استفاده از ویولت



مطرح می‌شوند که نیاز به مؤلفه‌های فرکانس بالا^{۱۱} دارند. مؤلفه‌های فرکانس بالا با افزایش مسافت DC تضعیف می‌شوند و قابلیت اطمینان این روش‌ها به چالش کشیده می‌شود [۲۳، ۲۴]. همچنین استفاده از هوش مصنوعی و روش‌های یادگیری در کنار روش‌های مطرح شده می‌تواند بسیاری از چالش‌های مطرح‌شده در رابطه با این روش‌ها را بهبود بخشد [۲۵].

از روش‌های حفاظتی مطرح‌شده، برخی نیاز به داده‌های دو طرف خط انتقال دارند و برخی تنها با داده‌های یک طرف، قادر به تصمیم‌گیری خواهند بود. حفاظت دو طرفه نیاز به خط ارتباطی دارد که علاوه بر تأخیر ایجادشده ناشی از انتقال اطلاعات و نیز مشکلات هم‌زمانی، خطای سیستم ارتباطی می‌تواند منجر به عملکرد نادرست سیستم حفاظتی شود.

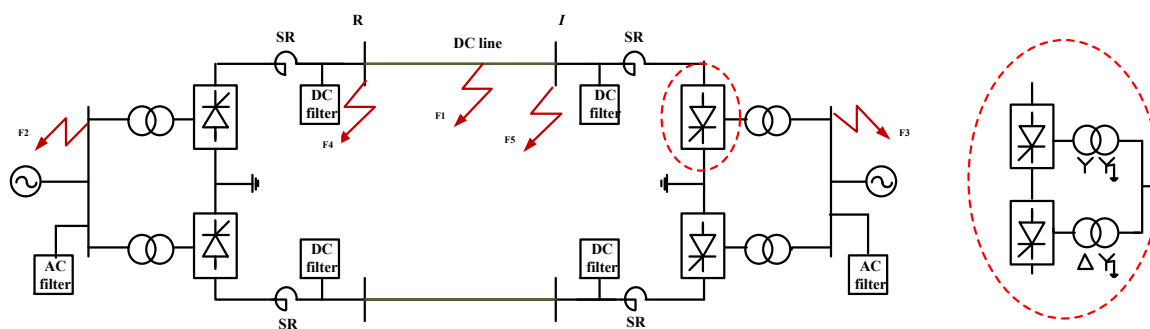
در این مقاله روشی در زمینه حفاظت DC ارائه می‌شود که با استفاده از داده‌های یک طرف خط انتقال، با نرخ نمونه‌برداری پایین و بر اساس مؤلفه‌های متقارن جریان^{۱۱} که هنگام خطا ایجاد می‌شوند، خطای خط DC را از خطای AC جدا کرده و به نحوی به حفاظت دیفرانسیل در تشخیص خطای داخل از خارج و افزایش سرعت عملکرد سیستم حفاظتی کمک می‌کند.

در این مقاله شبکه مورد تحلیل و اجزاء اصلی آن در بخش ۲ معرفی می‌شوند. در بخش ۳ توضیحی در مورد مؤلفه‌های متقارن جریان و ماتریس تبدیل آن داده می‌شود. در بخش ۴ دو روش حفاظتی بر اساس مؤلفه‌های متقارن جریان‌های AC سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده و جریان داخل مبدل‌های یکسوکننده و معکوس‌کننده، معرفی می‌شود که می‌تواند حفاظت دیفرانسیل را بهبود بخشد. در بخش ۵ با استفاده از شبیه‌سازی درستی روش‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی شبکه مورد مطالعه

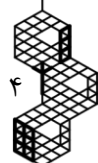
دو نوع مبدلی که به صورت متداول در سیستم‌های HVDC مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل مبدل منبع ولتاژ^{۱۲} (VSC) و مبدل منبع جریان^{۱۳} (CSC) هستند. اگرچه مبدل‌های منبع ولتاژ به دلیل کنترل پذیری بهتر و قابلیت اتصال به شبکه‌های AC ضعیف محبوب‌تر هستند [۲۶]؛ اما بیشتر سیستم‌های موجود در حال حاضر از نوع CSC هستند و حفاظت این سیستم‌ها جزء مسائلی است که تحقیقات در زمینه آن هم‌چنان ادامه دارد. سیستم‌های HVDC برپایه CSC دو نوع ساختار یک‌قطبی و دوقطبی دارند. ساختار دوقطبی قابلیت اطمینان بالاتری دارد و مدیریت شرایط خطای آن نسبت به نوع یک‌قطبی بهتر است [۲۵].

شبکه‌ای که در این مقاله مورد مطالعه قرار می‌گیرد، یک شبکه HVDC دو قطبی $1000 MW$ و $500 kV$ با مبدل منبع جریان دوازده پالسه است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. هر مبدل دوازده پالسه از طریق دو ترانسفورماتور YY و Δ مطابق شکل ۱، به خط انتقال DC با طول ۳۰۰ کیلومتر که با توجه به مدل وابسته به فرکانس شبیه‌سازی شده، متصل می‌باشد. فیلترهای DC برای حذف هارمونیک‌های DC ولتاژ و فیلترهای AC برای حذف هارمونیک جریان تعبیه می‌شوند. داده‌های این مقاله با شبیه‌سازی شبکه معرفی شده در نرم‌افزار PSCAD به دست می‌آیند.



شکل (۱): شبکه مورد مطالعه

با استفاده از روش پیشنهادشده در این مقاله و با توجه به داده‌های به دست‌آمده از اندازه‌گیری مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدل‌ها، می‌توان در مدت زمان کمتری نسبت به حفاظت دیفرانسیل و تنها با اندازه‌گیری داده‌های یک طرف خط انتقال، خطای داخل شبکه را از خطاهای نامتقارن خارج از شبکه تشخیص داد.



۳- مؤلفه‌های متقارن

در یک سیستم سه فاز متقارن، تنها توالی مثبت یا منفی فازها وجود دارد. اما زمانی که شبکه نامتقارن شود، می‌توان جریان‌های نامتقارن سه فاز I^{abc} را با استفاده از ماتریس تبدیل مؤلفه‌های متقارن، به یک سیستم متقارن از فازورها با توالی مثبت، منفی و صفر I^{12} تبدیل کرد. I_a^{12} فازورهای توالی صفر، مثبت و منفی فاز a می‌باشند که با توجه به آن، می‌توان فازور توالی بقیه فازها را به دست آورد.

در حالت عملکرد عادی شبکه، هریک از پایه‌های مبدل که به خط DC متصل هستند، در ۱۲۰ درجه جریان را هدایت می‌کنند. برای راحتی کار در ادامه مقاله، جریان سه فاز این پایه‌های مبدل که متصل به خط DC هستند را جریان داخل مبدل می‌گوییم. با توجه به هدایت ۱۲۰ درجه هریک از پایه‌ها، جریان سه فاز داخل مبدل‌ها، متقارن بوده و مؤلفه صفر و منفی ندارد. اما زمانی که خطا رخ می‌دهد، بسته به نوع خطا، ممکن است تقارن شبکه به هم بخورد و شاهد وجود مؤلفه‌های صفر و منفی در جریان داخل مبدل‌ها باشیم. در این مقاله جریان خط AC و نیز جریان داخل مبدل‌های یکسوکننده و معکوس‌کننده در شرایط مختلف خطا (خطای DC، خطای AC سمت یکسوکننده و خطای AC سمت معکوس‌کننده) اندازه‌گیری می‌شوند و با توجه به ماتریس تبدیل A مؤلفه‌های متقارن فرکانس اصلی آن‌ها به دست می‌آیند که بر اساس آن می‌توان یک روش حفاظتی را بر اساس مؤلفه متقارن تعریف کرد.

۴- معرفی روش حفاظتی

۴-۱- جریان AC سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده:

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، با توجه به استفاده از مبدل دوازده پالسه، ساختار ترانسفورماتور مبدل‌ها به صورت YΔ و YΔ است، که دو ترانسفورماتور Y و Δ در سمت DC (ثانویه) و ترانسفورماتور Y زمین‌شده در سمت AC (اولیه) قرار دارند. زمانی که خطای DC (F1) رخ می‌دهد، ترانسفورماتور Y نمی‌تواند مؤلفه صفر را از خود عبور دهد و در ترانسفورماتور Δ نیز جریان مؤلفه صفر وارد خط نمی‌شود. در نتیجه هنگام وقوع خطای DC، اصلاً مؤلفه صفر به وجود نمی‌آید و ترانسفورماتورهای سمت اولیه نیز مؤلفه صفر نخواهند داشت. پس هنگام وقوع خطای DC، هیچ کدام از جریان‌های AC و DC مؤلفه صفر نخواهند داشت.

هنگام ایجاد خطای AC در سمت یکسوکننده (F2) یا معکوس‌کننده (F3)، جریان مؤلفه صفر می‌تواند در ترانسفورماتور زمین‌شده که سمت خطا است و نیز بازوهای ترانسفورماتور Δ، برقرار شود. اما این جریان وارد خط ترانسفورماتور Δ نمی‌شود و در نتیجه در سمت ثانویه، این جریان به سمت DC منتقل نمی‌شود و در همان سمت خطا ایزوله می‌شود. بنابراین هنگام وقوع خطای AC، تنها سمتی که خطا در آن رخ داده دارای مؤلفه صفر جریان است و سمت دیگر AC و نیز قسمت DC شبکه دارای مؤلفه صفر جریان نیستند. با توجه به توضیحات داده شده می‌توان یک روش حفاظتی تعریف کرد که با توجه به داده‌های دوطرف سیستم، می‌تواند خطای DC را از AC تفکیک کند و بر خلاف حفاظت دیفرانسیل، که هنگام خطای AC، نیازمند تأخیر برای طی دوره گذرای ناشی از جریان شارژ خازنی خط است، این روش بدون تأخیر و با قابلیت اطمینان بالاتر قابل استفاده خواهد بود. هم‌چنین این روش به مقاومت خطا نیز وابسته نمی‌باشد.

۴-۲- بررسی جریان داخل مبدل‌ها

اگر شبکه را به صورت یک قطبی در نظر بگیریم، هنگامی که خطای DC در شبکه رخ می‌دهد، پس از طی دوره گذرای کوتاه مدت، هریک از پایه‌های متصل به خط DC، به طور متقارن و در ۱۲۰ درجه، خطا را تغذیه می‌کنند. اگر مؤلفه فرکانس اصلی جریان داخل مبدل‌ها را در نظر بگیریم، با توجه به هدایت متقارن پایه‌ها، تقارن فازی جریان آن‌ها به هم نمی‌خورد و مؤلفه‌های صفر و منفی در جریان داخل مبدل‌ها وجود نخواهند داشت. به دلیل وجود ترانسفورماتورهایی که مؤلفه صفر جریان را ایزوله می‌کنند، مبنای تصمیم‌گیری را مؤلفه منفی جریان قرار می‌دهیم. در نتیجه هنگام وقوع خطای DC، مؤلفه منفی جریان، در جریان داخل مبدل سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده وجود نخواهد داشت.

هنگام وقوع خطای نامتقارن AC (مثلاً خطای فاز a به زمین)، ولتاژهای شبکه نامتقارن می‌شوند. با توجه به ساختار شبکه و استفاده از ترانسفورماتور بین شبکه AC و DC، ولتاژ پایه‌های مبدل‌ها پس از عبور از ترانسفورماتورهای Y و Δ به صورت روابط (۱) و (۲) تعریف





می‌شوند که روابط (۱) مربوط به ولتاژهای نامتقارن دوسر پایه‌های مبدل متصل به ترانسفورماتور Y و روابط (۲) مربوط به ولتاژهای نامتقارن دو سر پایه‌های مبدل متصل به ترانسفورماتور Δ هستند [۲۷]. این ولتاژهای نامتقارن، سبب هدایت نامتقارن جریان در پایه‌های مبدل‌ها می‌شوند.

$$\begin{aligned} V_{yba} &= -\frac{3}{2} \frac{Z_{\Delta} + 3Z_f}{Z} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ V_{ybc} &= j \sqrt{3} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{yac} &= \frac{3}{2} \frac{Z_{\Delta} + 3Z_f}{Z} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ V_{\Delta ba} &= -\sqrt{3} \frac{Z_{\Delta} + 3Z_f}{Z} \\ V_{\Delta cb} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Z_{\Delta} + 3Z_f}{Z} + j \frac{3}{2} \\ V_{\Delta ac} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Z_{\Delta} + 3Z_f}{Z} - j \frac{3}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

Z_{Δ} و Z_Y و Z_f به ترتیب امپدانس توالی مثبت، منفی و صفر شبکه، $Z_f = Z_{\Delta} + Z_Y + 3Z_f$ تعریف می‌شوند. هنگامی که خطا در هریک از دو سمت یکسوکننده یا معکوس‌کننده رخ دهد، هدایت نامتقارن پایه‌های مبدل، سبب ایجاد جریان DC با فرکانس مرتبه ۲ می‌شود که این جریان در سمت دیگر، به عنوان ورودی پایه‌های مبدل دیگر، سبب نامتقارن شدن جریان مبدل می‌شود. در نتیجه خطای نامتقارن در هریک از دو سمت معکوس‌کننده یا یکسوکننده سبب ایجاد مؤلفه‌های صفر و منفی در جریان داخل مبدل هر دو طرف می‌شود.

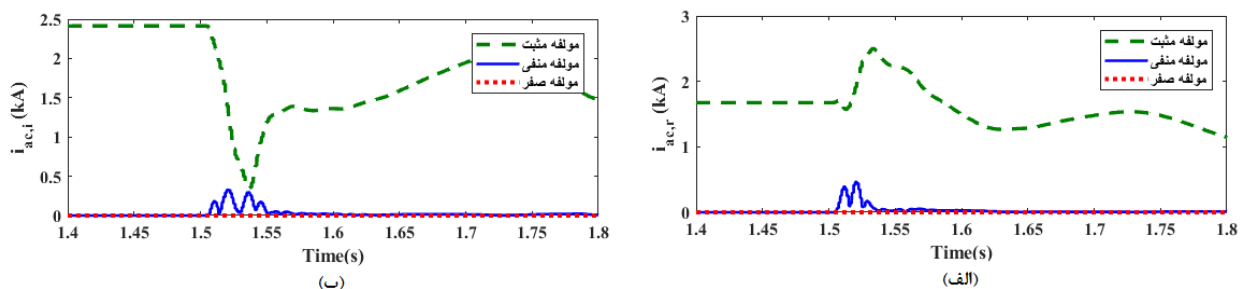
با توجه به توضیحات داده شده می‌توان یک روش حفاظتی بر اساس جریان داخل مبدل‌ها تعریف کرد که برخلاف روش توضیح داده شده در بخش ۴-۱ تنها به داده‌های یک طرف خط انتقال نیاز دارد و می‌تواند بدون نیاز به خط ارتباطی بین دو سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده، خطای AC و DC را از هم تفکیک کند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی روش حفاظتی پیشنهادشده، خطاهای مختلف AC و DC، با مقاومت ۱۰۰ اهم، به صورت جداگانه در لحظه ۱/۵ ثانیه به مدت ۰/۳ ثانیه روی شبکه اعمال و نتایج شبیه‌سازی همراه با الگوریتم حفاظتی پیشنهادی ارائه می‌شوند.

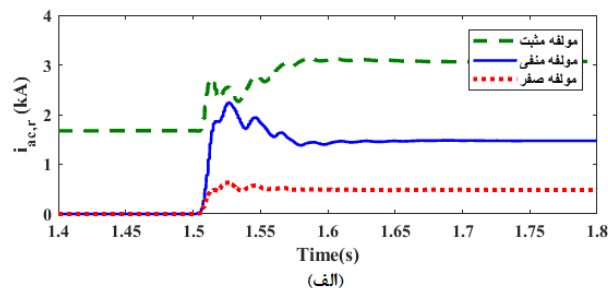
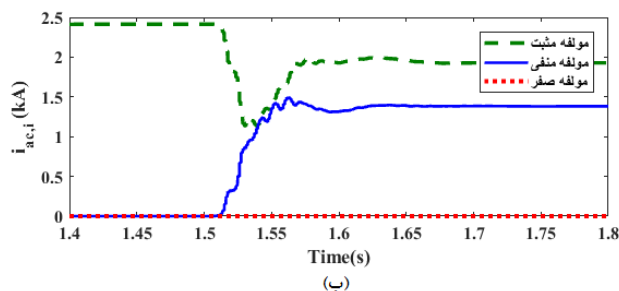
۵-۱- الگوریتم حفاظتی بر اساس جریان AC سمت مبدل‌ها

شکل‌های ۲ تا ۴، مؤلفه‌های متقارن جریان‌های AC سمت یکسوکننده ($i_{ac,r}$) و معکوس‌کننده ($i_{ac,i}$) را به ازای خطاهای مختلف AC و DC نشان می‌دهند. شکل ۲، مربوط به خطای DC (F1) است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگام وقوع خطای DC، مؤلفه صفر جریان، در هر دو نمودار جریان AC سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده، صفر است. در شکل ۳ که مربوط به خطای AC سمت یکسوکننده (F2) است، تنها جریان AC سمت یکسوکننده دارای مؤلفه صفر جریان است و در شکل ۴ که مربوط به خطای AC سمت معکوس‌کننده (F3) است، تنها جریان AC سمت معکوس‌کننده دارای مؤلفه صفر است.

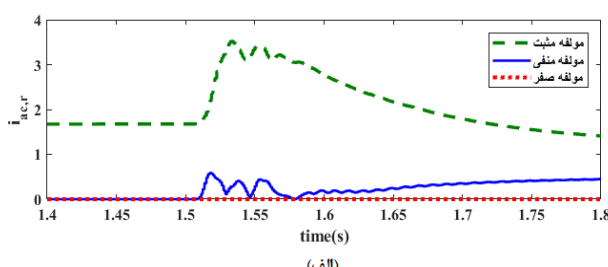
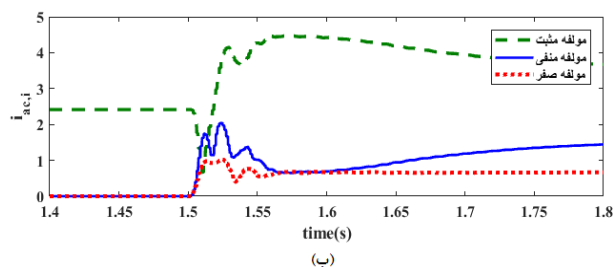


شکل (۲): مؤلفه‌های متقارن جریان‌های AC سمت الف) یکسوکننده ($i_{ac,r}$) و ب) معکوس‌کننده ($i_{ac,i}$) هنگام وقوع خطای DC





شکل (۳): مؤلفه‌های متقارن جریان‌های AC سمت الف) یکسوکننده ($i_{ac,r}$) و ب) معکوس‌کننده ($i_{ac,i}$) هنگام وقوع خطای AC سمت یکسوکننده



شکل (۴): مؤلفه‌های متقارن جریان‌های AC سمت الف) یکسوکننده ($i_{ac,r}$) و ب) معکوس‌کننده ($i_{ac,i}$) هنگام وقوع خطای AC سمت معکوس‌کننده

با توجه به توضیحات بخش ۴-۱ و نتایج شبیه‌سازی، پس از تشخیص وقوع خطا، می‌توان روش حفاظتی دوطرفه را به صورت زیر تعریف کرد:

$$i_{zac,i} = 0 \text{ و } i_{zac,r} = 0 \text{ خطای DC یا سه فاز متقارن}$$

$$i_{zac,i} = 0 \text{ و } i_{zac,r} \neq 0 \text{ خطای نامتقارن سمت یکسوکننده}$$

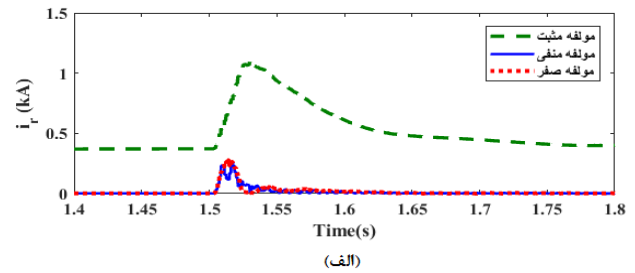
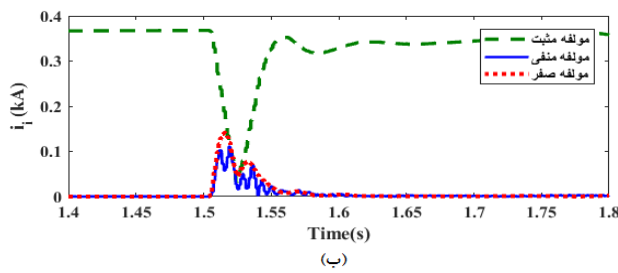
$$i_{zac,i} \neq 0 \text{ و } i_{zac,r} = 0 \text{ خطای نامتقارن سمت معکوس‌کننده}$$

که $i_{zac,r}$ مؤلفه صفر جریان AC سمت یکسوکننده و $i_{zac,i}$ مؤلفه صفر جریان AC سمت معکوس‌کننده است.

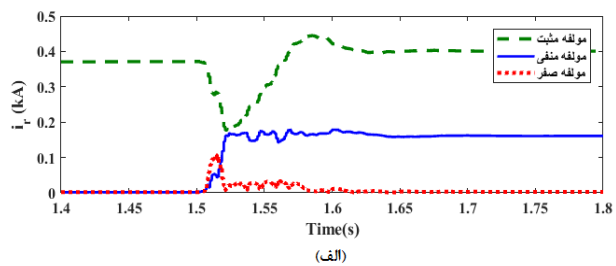
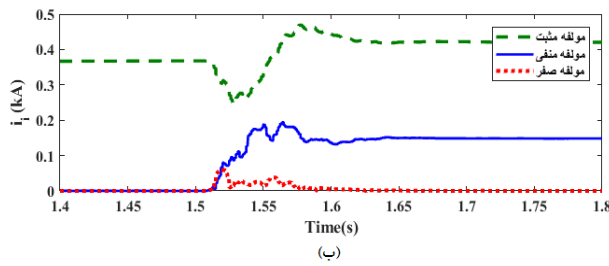
در روش فوق، تصمیم‌گیری برای تشخیص خطای داخل از خارج شبکه، با استفاده از داده‌های دو طرف خط انتقال انجام می‌گیرد و اگرچه به دلیل انتقال داده‌ها از طریق خطوط ارتباطی، تأخیر زمانی وجود دارد؛ اما تأخیر زمانی آن به اندازه حفاظت دیفرانسیل نیست. در ساختارهای HVDC موجود با مبدل دوازده پالسه که از ترانسفورماتورهای مشابه با این شبکه استفاده می‌شود، می‌توان از این روش حفاظتی کمک گرفت. اما با تغییر نوع شبکه، الگوریتم حفاظتی متفاوت خواهد بود. این روش با وجود قابلیت اطمینان بالاتر و سرعت عملکرد بیشتر نسبت به حفاظت دیفرانسیل، به دلیل وجود خط ارتباطی، در حوزه حفاظت پشتیبان عمل می‌کند.

۵-۲- الگوریتم حفاظتی یک طرفه بر اساس جریان داخل مبدل‌ها

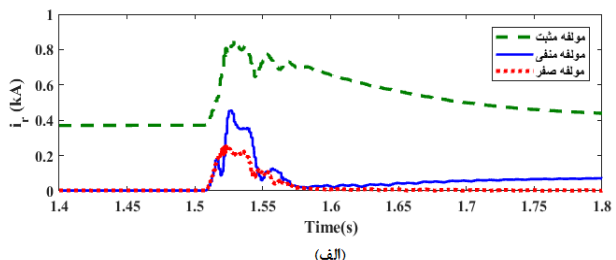
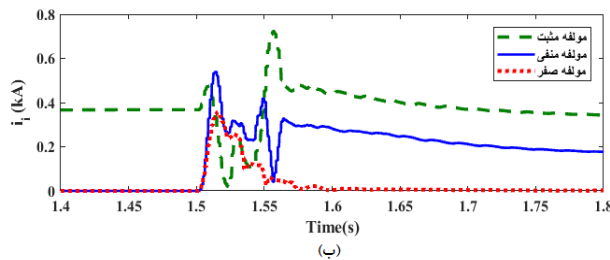
شکل‌های ۵ تا ۷ مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدل‌ها را به ازای خطاهای مختلف AC و DC نشان می‌دهند. از آن‌جا که مؤلفه صفر جریان تحت تأثیر نوع ترانسفورماتور مورد استفاده، می‌تواند ایزوله شود؛ مؤلفه منفی جریان‌ها را مبنای تصمیم‌گیری قرار می‌دهیم. در شکل ۵ که مربوط به خطای DC است، مؤلفه منفی جریان داخل مبدل‌های هر دو طرف پس از طی یک دوره گذرا صفر است و در شکل‌های ۶ و ۷، که مربوط به خطای AC سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده هستند، هر دو جریان i_r (جریان داخل مبدل یکسوکننده) و i_i (جریان داخل مبدل معکوس‌کننده) دارای مؤلفه منفی هستند. در نتیجه روش حفاظتی تعریف شده بر اساس جریان داخل مبدل‌ها به این صورت است که اگر هریک از $i_{n,r}$ (مؤلفه منفی جریان داخل مبدل یکسوکننده) و $i_{n,i}$ (مؤلفه منفی جریان داخل مبدل معکوس‌کننده)، مخالف صفر باشند، خطای AC رخ داده و نیازی به حفاظت DC نیست و در غیر این صورت خطای DC رخ داده و باید حفاظت DC عمل کند.



شکل (۵): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای DC



شکل (۶): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای AC در سمت یکسوکننده



شکل (۷): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای AC در سمت معکوس‌کننده

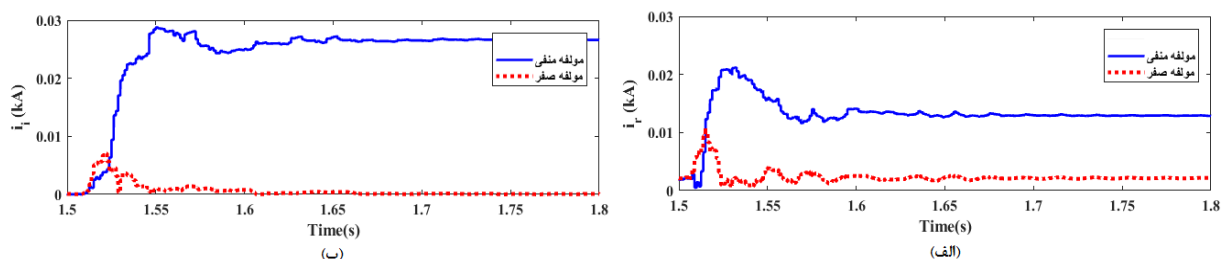
این روش حفاظتی، بر اساس داده‌های یک طرف خط انتقال عمل می‌کند و نیازی به خط ارتباطی و انتقال داده‌ها از دو انتهای خط ندارد. در نتیجه علاوه بر سرعت بالاتر به دلیل حذف زمان لازم برای انتقال داده، قابلیت اطمینان بالاتری نیز دارد و تحت تأثیر خرابی یا تأخیر انتقال داده‌ها قرار نمی‌گیرد.

۵-۳- تأثیر مقاومت خطا و مکان وقوع خطای DC

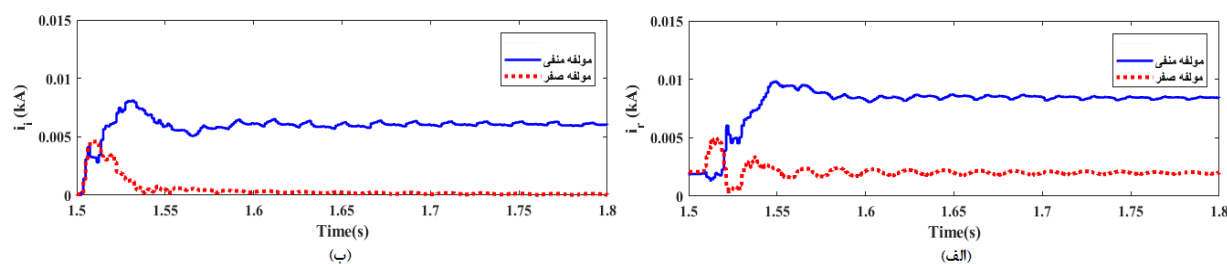
با توجه به شکل ۷، مشخص می‌شود که $i_{n,r}$ هنگام خطای AC سمت معکوس‌کننده، مقدار کم و نزدیک به صفر دارد. این شرایط با افزایش مقاومت خطا و کاهش جریان خطا بدتر می‌شود. از طرفی مقدار $i_{n,r}$ متعلق به خطای DC در شبکه شبیه‌سازی شده، در تمامی حالات حتی قبل از وقوع خطا نیز صفر مطلق نیست. این امر می‌تواند موجب تصمیم‌گیری اشتباه برای تفکیک خطای AC و DC شود. در ادامه خطاهای با مقاومت بالا در خطوط AC و نیز خطاهای با مقاومت پایین در مکان‌های مختلفی از خط DC شبیه‌سازی می‌شود و بر اساس آن یک الگوریتم حفاظتی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند در خطاهای AC با مقاومت بالا و خطاهای DC با مقاومت کم نیز تصمیم‌گیری درست را انجام دهد. نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹ مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدها در حالت خطای AC با مقاومت ۳۰۰ اهم را نشان می‌دهند. شکل ۱۰ نیز مؤلفه‌های متقارن جریان برای خطای وسط خط DC با مقاومت ۵ اهم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، در خطای DC، $i_{n,r}$ پس از طی دوره گذرای ۱۵۰ میلی‌ثانیه دارای مقدار متوسط ۰/۰۰۶ است که این مقدار با مقدار متوسط $i_{n,i}$ در خطای سمت معکوس‌کننده با مقاومت خطای ۳۰۰ اهم تقریباً برابر است و این امر می‌تواند الگوریتم حفاظتی را



در تفکیک خطای DC و AC دچار مشکل کند. بنابراین الگوریتم حفاظتی باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند این خطاها را از هم تفکیک کند. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ مشخص می‌شود که در حالت خطای AC مقدار متوسط مؤلفه صفر و منفی جریان با هم تفاوت دارند؛ اما در حالت خطای DC این مؤلفه‌ها نزدیک به هم هستند. از این رو می‌توان با مقایسه مقدار متوسط جریان مؤلفه منفی و صفر، خطاهای با مقاومت بالا را نیز از هم تفکیک کرد.

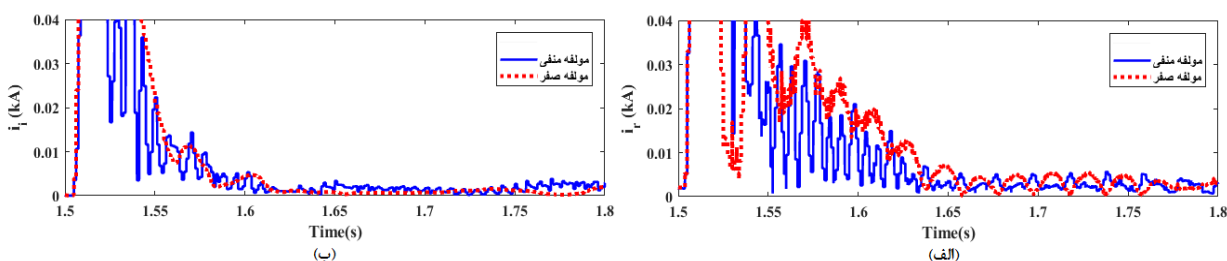


شکل (۸): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای AC با مقاومت ۳۰۰ اهم در سمت یکسوکننده

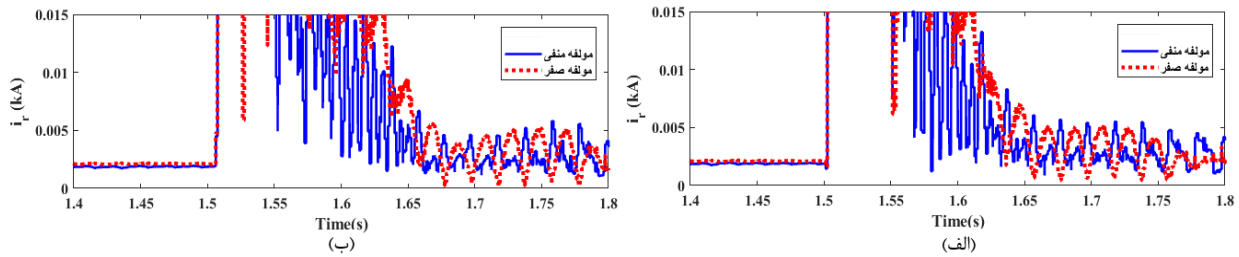


شکل (۹): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای AC با مقاومت ۳۰۰ اهم در سمت معکوس‌کننده

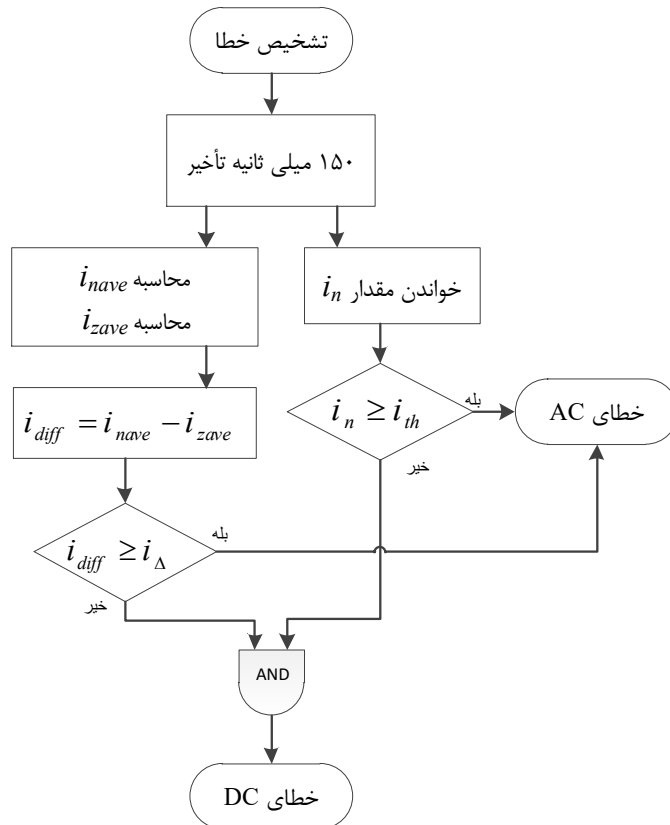
مشابه شبیه‌سازی شکل ۱۰ که مربوط به خطای DC با مقاومت کم است، خطای DC نزدیک به یکسوکننده (F4) و نزدیک به معکوس‌کننده (F5) نیز شبیه‌سازی شده و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان‌دهنده این است که خطای ابتدا، انتها و وسط خط DC تغییری در مقدار و رفتار مؤلفه‌های منفی و صفر جریان داخل مبدل‌ها ایجاد نمی‌کند. بنابراین می‌توان الگوریتمی مطابق شکل ۱۲ تعریف کرد که در مقاومت‌های بالا نیز با توجه به تفاوت مقدار متوسط جریان منفی و صفر، خطای DC و AC را از هم تفکیک کند.



شکل (۱۰): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدهای الف) یکسوکننده (i_r) و ب) معکوس‌کننده (i_i) هنگام وقوع خطای DC با مقاومت ۵ اهم وسط خط انتقال DC



شکل (۱۱): مؤلفه‌های متقارن جریان داخل مبدل یکسوکننده هنگام وقوع خطای DC با مقاومت ۵ اهم الف) خطای نزدیک به یکسوکننده (F4)، ب) خطای نزدیک به معکوس کننده (F5)



شکل (۱۲): فلوچارت روش حفاظتی

در الگوریتم شکل ۱۲، هنگام وقوع خطای AC با مقاومت پایین، مقدار قابل توجهی جریان مؤلفه منفی در سمت مبدل‌ها (i_n) به وجود می‌آید و در حالت خطای DC این مقدار ناچیز است، در نتیجه در صورتی که خطای AC با مقاومت خطای پایین رخ داده باشد، الگوریتم پس از طی دوره گذرای ۱۵۰ میلی ثانیه، با مقایسه مقدار i_n و مقدار i_{th} خطای AC را تشخیص می‌دهد. مقدار i_{th} یک مقدار آستانه تعریف شده است که به دلیل صفر مطلق نبودن $i_{n,r}$ در حالت خطای DC و عدم تصمیم‌گیری اشتباه، برابر با ۰/۰۱ تعریف می‌شود. در صورتی که خطای AC با مقاومت بالا رخ داده باشد، مقدار i_n کاهش می‌یابد و به صفر نزدیک می‌شود. اما با توجه به اینکه در خطای DC، i_n و i_z (مقدار مؤلفه صفر جریان داخل مبدل) دارای مقدار متوسط تقریباً یکسانی هستند ولی در خطای AC مقدار متوسط آن‌ها متفاوت است؛ پس از طی دوره گذرای ۱۵۰ میلی ثانیه و با متوسط‌گیری از مقادیر i_n و i_z و مقایسه اختلاف آن‌ها با مقدار i_{Δ} که در این شبکه ۰/۰۵ در نظر گرفته شده، خطای AC از DC تشخیص داده می‌شود. با توجه به این که الگوریتم حفاظتی شکل ۱۲، تصمیم‌گیری را بر مبنای داده‌های یک طرف خط انتقال انجام می‌دهد، به کارگیری آن در هریک از دو سمت معکوس کننده و یکسوکننده قابل اجرا است و محدودیت‌های مربوط به وجود خط ارتباطی برای انتقال داده‌ها در آن وجود ندارد.



این روش حداکثر با تأخیر ۲۰۰ میلی ثانیه قادر به تشخیص خطای داخل از خارج شبکه خواهد بود. از آن جا که حفاظت دیفرانسیل در طول دوره گذرای خطا به دلیل وجود جریان خازنی توزیع شده قادر به تشخیص خطای داخلی نیست و زمان تأخیر ۵۰۰ میلی ثانیه و زمان بلاک ۶۰۰ میلی ثانیه‌ای برای جلوگیری از عملکرد نادرست آن اعمال می‌شود [۷]. روش معرفی شده در این مقاله می‌تواند در کنار حفاظت دیفرانسیل، به عنوان حفاظت پشتیبان عمل کند و سرعت عملکرد و قابلیت اطمینان روش حفاظتی را بالا ببرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو روش حفاظتی معرفی شد که بر اساس مؤلفه‌های متقارن جریان، خطای داخل از خارج شبکه را تشخیص می‌دهد. در روش اول بر اساس مؤلفه صفر جریان AC سمت یکسوکننده و معکوس‌کننده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، تصمیم‌گیری انجام می‌شود. قطعیت این روش بالا است و تأخیر آن فقط تأخیر خط ارتباطی است. اما با توجه به ایزوله شدن مؤلفه صفر در برخی ترانسفورماتورها، الگوریتم تصمیم‌گیری مناسب مبدل دوازده پالسه بوده و با تغییر نوع مبدل و ترانسفورماتورهای شبکه، الگوریتم حفاظتی می‌تواند متفاوت باشد.

روش دوم برای شبکه یک‌قطبی و بر اساس مؤلفه منفی جریان داخل مبدل‌ها پس از طی یک دوره گذرای ۱۵۰ میلی ثانیه‌ای عمل می‌کند که با افزایش مقاومت خطا تأخیر زمانی ممکن است تا ۲۰۰ میلی ثانیه نیز طول بکشد. این روش بر اساس داده‌های یک سمت خط انتقال عمل می‌کند و مشکلات مربوط به خط ارتباطی را ندارد و می‌تواند در کنار حفاظت دیفرانسیل سرعت عملکرد آن در تشخیص خطای AC را افزایش داده و از متوقف‌سازی سیستم DC، هنگام خطای AC جلوگیری کند.

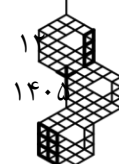
مراجع

- [1] H. Ranjbar, M. Vesali, and N. A. Motamedi, "A two input high Step converter with zero current switching condition for switches turn-on instances," *Technovations of Electrical Engineering & Green Energy System*, vol. 1, no. 2, pp. 63-76, 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.1960073.1017.
- [2] A. Salim and B. Keyvani, "An isolated bidirectional converter with zero current switching for photovoltaic applications," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, no. 2, pp. 1-16, 2024, doi: 10.30486/teeges.2024.1999301.1104.
- [3] M. Tavoosi, F. E. Heydarian, M. H. Amiroun, and M. M. Parsa, "A review on the technical challenges of connecting wind energy conversion systems to the grid," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 1, no. 3, pp. 40-74, 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.1965932.1031.
- [4] N. Taheri, H. Orojlo, and F. Ebrahimi, "Damping controller design in offshore wind power plants to improve power system stability using fractional order PID controllers based on optimized exchange market algorithm," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 51, pp. 91-110, 2022.
- [5] A. Daghighi, "Improving the dynamic stability of power grids including offshore wind farms and equipped with HVDC transmission system using adaptive neural controller," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 24, pp. 79-99, 2020.
- [6] J. Zheng, M. Wen, Y. Chen, and X. Shao, "A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 94, pp. 171-178, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.07.006.
- [7] Y. Zhang, Y. Li, J. Song, B. Li, and X. Chen, "A new protection scheme for HVDC transmission lines based on the specific frequency current of DC filter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 420-429, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2867737.
- [8] S. Ankar and A. Yadav, "Wavelet-ANN based fault location scheme for bipolar CSC-based HVDC transmission system," in *2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, 2020, pp. 85-90, doi: 10.1109/ICPC2T48082.2020.9071450.
- [9] F. D. Marvasti and A. Mirzaei, "A novel method of combined DC and harmonic overcurrent protection for rectifier converters of monopolar HVDC systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 892-900, 2017, doi: 10.1109/ICPC2T48082.2020.9071450.
- [10] F. Dehghan Marvasti, A. Mirzaei, and M. E. Hamedani Golshan, "Novel pilot protection scheme for line-commutated converter high voltage direct current transmission lines based on behaviour of





- characteristic harmonic impedances," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 15, no. 2, pp. 264-278, 2021, doi: 10.1049/gtd2.12018.
- [11] D. Wang, H. Gao, S. Luo, and G. Zou, "Travelling wave pilot protection for LCC-HVDC transmission lines based on electronic transformers' differential output characteristic," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 93, pp. 283-290, 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.06.004.
 - [12] X. Min, C. Zexiang, H. Kunlun, and Z. Yongjun, "A sensitive and high-speed traveling wave protection scheme for HVDC transmission line," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 393-404, 2015, doi: 10.1002/etep.1837.
 - [13] S. J. Ankar and A. Yadav, "A high-speed protection strategy for bipolar CSC-Based HVDC transmission system," *Electric Power Components and Systems*, vol. 49, no. 1-2, pp. 48-66, 2021, doi: 10.1080/15325008.2021.1937397.
 - [14] A. Khaleghi-Abbasabadi, M. Mehrabi-Kooshki, S. S. Mirhosseini, and S. Jamali, "Pilot protection method for bipolar CSC-HVDC transmission lines based on transient currents behaviour," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 4, pp. 856-874, 2023, doi: .
 - [15] M. Mehrabi-Kooshki, S. S. Mirhosseini, and S. Jamali, "Single-end protection algorithm for HVDC transmission lines based on the current difference," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 20, pp. 4339-4351, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1621.
 - [16] J. Suonan, J. Zhang, Z. Jiao, L. Yang, and G. Song, "Distance protection for HVDC transmission lines considering frequency-dependent parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 723-732, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2232312.
 - [17] D. Liu *et al.*, "Evaluation of HVDC system's impact and quantification of synchronous compensation for distance protection," *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 9, pp. 1925-1940, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2232312.
 - [18] J. Zheng, M. Wen, Y. Qin, X. Wang, and Y. Bai, "A novel pilot directional backup protection scheme based on transient currents for HVDC lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, p. 105424, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105424.
 - [19] Z. Dai, N. Liu, C. Zhang, X. Pan, and J. Wang, "A pilot protection for HVDC transmission lines based on transient energy ratio of DC filter link," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 4, pp. 1695-1706, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2950350.
 - [20] Z. Zheng, T. Tai, J. S. Thorp, and Y. Yang, "A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmission line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2278-2285, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2201509.
 - [21] G. Song, X. Chu, S. Gao, X. Kang, and Z. 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. 2, pp. 599-607, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2300183.
 - [22] S. Luo, X. Dong, S. Shi, and B. Wang, "A directional protection scheme for HVDC transmission lines based on reactive energy," *IEEE transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 559-567, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2461450.
 - [23] J. Duan, H. Li, Y. Lei, and L. Tuo, "A novel non-unit transient based boundary protection for HVDC transmission lines using synchrosqueezing wavelet transform," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, p. 105478, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105478.
 - [24] H. Ha, Y. Yu, R. Yi, Z. Bo, and B. Chen, "Novel scheme of travelling wave based differential protection for bipolar HVDC transmission lines," in *2010 International conference on power system technology*, 2010: IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666376.
 - [25] M. Farshad and M. Karimi, "Intelligent protection of CSC-HVDC lines based on moving average and maximum coordinate difference criteria," *Electric Power Systems Research*, vol. 199, p. 107439, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2021.107439.
 - [26] M. Muniappan, "A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 1-20, 2021, doi: 10.1186/s41601-020-00173-9.
 - [27] J. Wang, M. Huang, C. Fu, H. Li, S. Xu, and X. Li, "A new recovery strategy of HVDC system during AC faults," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 486-495, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2892410.



-
- ^۱ Renewable energies
 - ^۲ High voltage direct current
 - ^۳ Travelling wave protection
 - ^۴ Voltage derivation
 - ^۵ Main protection
 - ^۶ Differential protection
 - ^۷ Backup protection
 - ^۸ Transient components
 - ^۹ Characteristic harmonic current
 - ^{۱۰} High frequency components
 - ^{۱۱} Current symmetrical components
 - ^{۱۲} Voltage source converter
 - ^{۱۳} Current source converter

