

Winter 2024, 5 (4), 155-167 DOR:

Received: 20 Nov 2024 Accepted: 16 Mar 2025

مقاله پژوهشی

A Novel Scheme to Improve the Performance of Distance Protection in Wind Farm Collector Lines

Alireza Moradi^{1*}, Hadi Ziaei², Seyyed Mohammadreza Hashemi³

1. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Mahdishahr Branch, Islamic Azad University, Mahdishahr, Iran. **Corresponding Author*, <u>alireza.moradi@iau.ac.ir</u>

2. Assistant professor, Department of Mathematics, University of Birjand, Birjand, Iran.

3. Research assistant 'Faculty of Mathematics, Statistics Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

Introduction: Today, due to the energy crisis as well as the economic and environmental problems associated with fossil fuels, the use of renewable energies such as wind farms as clean and almost free energy sources plays a major role in the energy production required by some countries. Considering the importance of protection of renewable resources (wind farms), it is of great importance to provide and review solutions to improve the performance of the protection system in different operating conditions. In this paper, a new scheme to improve the performance of distance protection in wind farm collector lines is presented.

Method: In this paper, a new scheme to improve the performance of distance protection in wind farm collector lines is presented. In order to validate the performance of the proposed design, this design has been implemented in the MATLAB software environment on a sample wind farm and tested and simulated in different operating conditions.

Results: In order to validate the performance of the proposed design, this design has been implemented in the MATLAB software environment on a sample wind farm and tested and simulated in different operating conditions. The simulation results show the efficiency and performance of the proposed design.

Discussion: In this paper, a new scheme to improve the performance of distance protection in wind farm collector lines is presented. The studied wind farm consists of several wind turbines equipped with two-way induction generators. This proposed plan can be used in all operating conditions such as low wind farm production. High adaptability and insensitivity to fault resistance are important and practical aspects of the proposed distance protection scheme. In order to validate the performance of the proposed design, this design has been implemented in the MATLAB software environment on a sample wind farm and tested and simulated in different operating conditions. The simulation results show the efficiency and performance of the proposed design.

Keywords: Fault Impedance, Distance Protection, Collector Lines, Wind Farm.





Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)

یک طرح جدید برای بهبود عملکرد حفاظت دیستانس در خطوط جمعکننده مزرعه بادی

دورهٔ پنجم، زمستان ۱٤۰۳ شمارهٔ چهارم، صص: ۱۵۵–۱۹۷ تاریخ دریافت: ۳۰/ ۰۸/ ۱٤۰۳ تاریخ پذیرش: ۲٦/ ۱۲/ ۱٤۰۳

علیرضا مرادی'*، هادی ضیائی'، سیدمحمدرضا هاشمی'

۱. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مهدیشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیشهر، ایران. (نویسندهٔ مسئول) <u>hziaei@birjand.ac.ir</u> ۲. استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. <u>hziaei@birjand.ac.ir</u> ۳. استادیار پژوهشی دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. <u>smr.hashemi@shahroodut.ac.ir</u>

واژههای کلیدی: امپدانس خطا، حفاظت دیستانس، خطوط جمع کننده، مزرعه بادی.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به نفوذ بالای مزارع بادی و افزایش ظرفیت تولید این مزارع در سیستمهای قدرت، مطالعه در مورد توربینهای بادی، ژنراتورهای متصل به توربینها، نحوه کنترل و حفاظت از این نوع مزارع توجه بیشتری را به خود جلب کردهاست [۱]. در میان انواع مختلف ژنراتورهای به کاررفته در توربینهای بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه بیشترین استفاده را دارند [۲]. در مزارع بادی دو دسته خط انتقال وجوددارد. دسته اول خطوط جمع کننده هستند که در سطح ولتاژ پایین قرار دارند و توان تولیدی یک یا چند عدد توربین بادی را به پست اصلی مزرعه بادى انتقال مىدهند. دسته دوم نيز خطوط انتقال ولتاژ بالا هستند که مجموع توان تولیدی کل مزرعه بادی را به سیستم قدرت تحویل می-دهند. با توجه به اهمیت مسئله حفاظت مزارع بادی، درصورتی که تشخيص اشتباه وقوع خطا و يا عدمتشخيص وقوع خطاى اتصال كوتاه بهدرستی تشخیص دادهنشود میتوان به مزرعه بادی (ژنراتور القایی دوسو تغذیه) آسیب وارد کرده و عملکرد آن را مختل نماید. حفاظت دیستانس، یک حفاظی جامع در برابر انواع اتصال کوتاهها میباشد که کاربردی فراوان در شبکههای انتقال و فوق توزیع دارد که در صورت وقوع خطا در ناحیهی تحت پوشش خود با خارج نمودن آن ناحیه از مدار، شبکه را به حالت عملکرد عادی پایدار برمی گردانند. در همین راستا، در این مقاله، یک طرح جدید جهت بهبود عملکرد حفاظت دیستانس در خطوط جمع کننده بادی ارائه شده است که طرح ارائه شده دارای تطبیق پذیری بالا، عدم حساسیت به مقاومت خطا، مناسب برای سیستم تغذیه ضعیف، استفاده از امپدانس دیدهشده از نقطهی رله گذاری و زمین برای رلهها نسب به روشهای ارائهشده میباشد. همچنین روش ارائهشده قابلیت به کار گیری در تمامی شرایط بهرهبرداری (حداقل و حداکثر تولید) را دارا می باشد. در این مقاله، سیستم حفاظتی خطوط جمع کننده مدل نشده ست.

در حال حاضر، بیشتر مطالعات صورت گرفته در حفاظت خطوط ولتاژ بالای انتقال مزارع بادی تمرکز دارند [۳]، و تعداد تحقیقات در مورد حفاظت از خطوط جمع کننده ولتاژ پایین کم است [۴]. در واقع، احتمال وقوع خطا در خطوط جمع کننده بیشتر از احتمال وقوع خطا در خطوط انتقال ولتاژ بالای مزرعه بادی است و عدم رفع مناسب خطا، باعث از مدار خارجشدن چندین مزارع بادی می شود. بنابراین مطالعه دقیق در موردحفاظت خطوط جمع کننده مزرعه بادی و ارائه یک طرح حفاظتی قابل اجرا برای آن، جهت حفظ امنیت و ثبات شبکه برق الزامی است. در سال های اخیر، طرحهای بسیار مناسبی برای رله های دیستانس تطبیقی ارائه شدهاست. در [۵]، طرح حفاظت را از منظر حذف اثر مقاومت خطا بر امپدانس اندازه گیری شده، برر سی کردها ست. با جبران امپدانس اضافی خطا ناشی از مقاومت خطا، امپدانس

اندازه گیری شده می تواند به در ستی منعکس کننده امپدانس میان نقطه خطا تا نقطه رله باشد. در [۶]، ابتدا محل اصلى خطا محاسبه و سپس بررسے می شود که آیا موقعیت خطا در محدوده حفاظتی تنظیم شده قرار دارد یا خیر. در [۷]، امپدانس خط را با شبکه عصبی مصنوعی محا سبهمی کند. طرح حفاظت دید ستانس دیجیتال با مقایسه امپدانس اندازه گیری شده فازهای مختلف در [۸] ارائه شده است. در [۹]، طرح حفاظت دید ستانس تطبیقی دقیق و سریع بر ا ساس یادگیری ما شین برای خطوط انتقال در حضور SSSC ارائه شدها ست. الگوریتمی مبتنی بر ترکیب اندازه مقاومت و مشخصه ولت-آمپر مقاومت خطا برای تشـخیص علت خطا، در [۱۰] ارائه شـدهاسـت. یک الگوریتم حفاظت دیستانس دیجیتال جدید برای جبران اشتباهات محاسبهای رلههای دیجیتال معمولی در تشـخیص خطای تک فاز به زمین با مقاومت بالا در [۱۱] ارائه شـدهاست. در [۱۲]، یک مدل برای بیان توانایی توان راکتیو یک نیروگاه بادی بر اساس یک سیستم جمع آوری انرژی ارائه شده ا ست. وابستگی توان راکتیو به ولتاژ و توان اکتیو، با توجه به تلفات توان در سیستم جمع کننده محاسبه شده است.

مزارع بادی در مقیاس بزرگ معمولاً در سیستم انتقال یکپارچه می شوند. اعمال استراتژی های حفاظت شده مبتنی بر فرکانس حالت پایدار سنتی در این خطوط انتقال، چالشهایی را ایجادمی کند. عملکرد سیستمهای حفاظتی که از فازورهای دوطرفه استفادهمی کنند (مانند طرح های دیفرانسیل جریان) در زمانی که مزارع بزرگ بادی بزرگ در سیستم یکپارچه شدهاند، تحت تأثیر قرارمی گیرد و ممکن است وقوع یا عدم وقوع خطای اتصال کوتاه را ا شتباه تشخیص دهند. در [۱۳]، یک طرح حفاظتی مبتنی بر شـباهت شـکل موج جریان گذرای تماموقت برای مقابله با این مسائل پیشنهادشده است. این طرح حفاظتی از فر کانس های توان و غیرتوانی را در نظر می گیرد و می توا ند تأثیر خطاهای محاسبه فازور را به حداقل برساند. تنها چند ادبیات تحقیقاتی در مورد حفاظت از خطوط جمع کننده نیرو گاه بادی وجود دارد. در [۱۴]، خطاهای داخلی شبکه جمعکننده چندپایانهای dc مزرعه بادی را به تفصیل موردبررسی قرار داده است و یک طرح حفاظت جدید را ارائهنموده که از تغییرات ولتاژ لینک dc برای تشخیص خطاهای AC از خطاهای dc استفاده کرده است که در آن توپولوژی شعاعی توربین بادی با اتصال ستاره یا رشتهای در نظر گرفته شدهاست. در [۱۵]، یک طرح حفاظت رله را برای مزارع بادی پیشنهاد داده که حفاظت اتصال کوتاه را برای یک مدار جمع کننده ولتاژ متوسط (MV) و ولتاژ کم (LV) فراهممی کند. در [۱۶]، الگوریتم گرگ خاکستری برای بر نامهریزی چند ساله تو سعه انتقال از نگاه جذب سرمایه گذار خصو صی با لحاظ کردن عدم قطعیتها و خازن سری ثابت استفاده شدها ست. در [۱۷]، رو شی هو شمند برای شنا سایی جریان خطا از ا شباع ترانسفورماتور جریان در ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شدهاست. در [۱۸]، برنامه

ریزی چند ساله تو سعه تولید و انتقال با جایابی تران سفورماتور شیفت دهنده ی فاز مطالعه شده است. در [۱۹]، تخمین شاخص فیدرهای فلیکرزا با روش ترکیبی نمونه برداری - شبیه سازی ارائه شده است. در [۲۰]، تقسیم توان بین اینورترهای ریز شبکه جزیره ای با اصلاح روش کنترل افتی ارائه شده است.

روش پیشنهادی در این مقاله قادر به استفاده از کلیه شرایط عملیاتی مانند تولید کم مزرعه بادی است. تطبیق پذیری بالا و عدم حسا سیت به مقاومت خطا از جنبههای ا سا سی و عملی طرح حفاظت دیستانس پیشنهادی است. طرح پیشنهادی بروی یک مزرعه بادی نمونه در محیط نرمافزار MATLAB پیاده سازی و برای اعتبارسنجی عملکرد طرح پیشنهادی در شرایط عملیاتی مختلف شبیهسازی شدهاست. نتایج شبیهسازی نشاندهنده کارایی و اثربخشی طرح پیشنهادی است.

ساختار مقاله به شرح ذیل است: بخش ۲، چالشهای حفاظتی خطوط جمع کننده مزرعه بادی را ارائهمی دهد. بخش ۳ مدلسازی ساختار حفاظت دیستانس پیشنهادی برای خطوط جمع کننده مزرعه بادی است. بخش ۴ و ۵ به ترتیب نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری است.

۲. چالشهای حفاظتی خطوط جمع کننده مزرعه بادی

در مزرعه بادی، سیستم جمعکننده ژنراتور بادی، ترمینالهای سمت فشارقوی ترانسفورماتورهای افزاینده ۵ الی ۱۰ عدد ژنراتور مجاور را با یک کابل موازی کرده و سپس آنها را با یک خط جمعکننده ۱۰ یا ۳۵ کیلوولتی به پست افزاینده مزرعه بادی انتقالمیدهد. از جمله معایب در حفاظت این خط جمعکننده مزرعه بادی میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- قابلیت تشخیص ضعیف: به دلیل تغذیه ضعیف ژنراتور بادی، سهم مؤلفههای توالی منفی و مثبت در جریان خطای عبوری از خطوط جمع کننده، خیلی کوچک تر از مؤلفه توالی صفر است.
- حساسیت کم: خطوط جمع کننده مزرعه بادی با مقاومت یا سیم پیچ مهار قوس زمین می شوند [۲۱, ۲۲]. هنگام وقوع خطا، مقاومت خطا تا حد زیادی عملکرد حفاظت دیسیتانس را تحت تأثیر قرارمی دهد.

با توجه به مشکلات بالا تشخیص و رفع سریع خطا برای سیستم حفاظت خط جمعکننده مزرعه بادی برای شبکههای قدرت بسیار ضروری و مهم میباشد. در همین راستا، نیاز است تا طرحهای حفاظتی جدید برای تضمین عملکرد ایمن مزرعه بادی بررسی و ارائه شوند.

۳. مدلسازی ساختار حفاظت دیستانس پیشنهادی برای خطوط جمع کننده مزرعه بادی

ساختار حفاظتی اصلی مزرعه بادی در شکل (۱) نشان داده شده است.سمت فشارقوی ترانسفورماتورهای ۳ تا ۸ ژنراتور بادی با هم موازی شده (با توجه به اصل مجاورت)، سپس با یک خط جمع کننده ۳۵ کیلوولتی به پست افزاینده انتقال می یابند. در پست افزاینده، توان

جمع آوری شده به ولتاژ ۱۱۰ یا ۲۲۰ کیلوولت رسیده و به سیستم قدرت متصل می شود. همچنین مدل تحلیل حفاظت دیستانس در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱: دیاگرام مزرعه بادی متصل به شبکه

در شکل (۲)، M سمت سیستم جمع کننده (سمت مزرعه بادی)، \dot{E}_{3} ولتاژ ســمت توربین بادی و N ســمت شــبکه با ولتاژ \dot{E}_{3} را نشانمی دهند. در این شکل، امپدانس های معادل سمت توربین بادی و شبکه به ترتیب برابر $_{Z}$ و $_{Z}$ ه ستند. همچنین میزان تنظیم ر سایش رله دیستانس تا نقطه P تنظیم شده است. بنابراین، ناحیه حفاظتی برابر MP و مقدار امپدانس متناظر با آن برابر $_{Set}$ خواهدبود. همچنین در شـکل (۲)، F نقطه خطا و Z امپدانس توالی مثبت خط از نقطه خطا تا مکان قرار گیری رله دیستانس است.



شکل ۲: مدل استفاده شده برای تحلیل حفاظت دیستانس تطبیقی

هنگام وقوع خطا در خط جمع کننده، فازور ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در نقطه رله به ترتیب با \dot{U}_m و \dot{I}_m نشان داده شده است. این دو پارامتر مطابق رابطه (۱) به امپدانس Z و ولتاژ نقطه خطا ارتباط می یابند:

$$\dot{U}_m = \dot{I}_m Z + \dot{U}_f \tag{1}$$

که \dot{U}_f فازور ولتاژ نقطه خطا و Z امپدانس میان محل رله تا نقطه خطا است. با تقسیم دو سمت شکل (۱) بر \dot{I}_m میتوان امپدانس نقطه رله را محاسبه کرد [۱۱].

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = Z + \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_m} = Z + \frac{\dot{I}_f R_g}{\dot{I}_m} \tag{(7)}$$

لنامه سامانههای پردازشی و ارتباطی چندرسانهای هوشمند-سال پنجم، شمار ه چهارم، پیاپی شماره ۱۸، زمستان ۱٤۰۳

که l_f جریان اتصال کوتاه و R_g مقاومت خطا است. امپدانس از اندازه گیریشده Z (میزان امپدانس از اندازه گیریشده Z_m از امپدانس خطای واقعی Z (میزان امپدانس از نقطه رله تا محل وقوع خطا) و امپدانس اضافی ممکن است باعث عملکرد خطا ایجادشده است. این امپدانس اضافی ممکن است باعث عملکرد ا شتباه حفاظت دی ستانس سنتی شود. دیاگرام فازوری جریان و ولتاژ خط جمع کننده، در شکل (۳) نشان دادهشده است.



شکل ۳: دیاگرام فازوری ولتاژ و جریان هنگام وقوع خطا در خطوط جمع کننده مزرعه بادی

 $\dot{U}_{h|0|}$ ، $\dot{U}_{h|0|}$ و $\dot{U}_{f|0|}$ به ترتیب ولتاژ باس M، باس N و نقطهی خطای F در حالت عملکردی نر مال هستند. $\dot{I}_n \ \dot{I}_n \ \dot{I}_n - \dot{I}_n$ و \dot{I}_1 به ترتیب جریان در نقطه رله گذاری در سیمت سیستم جمع کننده، جریان تزریق شده از سمت سیستم قدرت به محل خطا، و جریان نقطهی خطا هستند و توالی صفر سه جریان $\dot{I}_n = \dot{I}_n - \dot{I}_n$ حاصل می شود.

در این حالت، Ψ اختلاف زاویه بین جریان اندازه گیری I_m و ولتاژ نقطه خطا \dot{U}_f است. هنگامی که خطا در نقطه مشابه ولی با مقاومت خطای متفاوت رخمی دهد، \overline{OF} در امتداد قوس خطچین به سمت $\dot{U}_{f|0|}$ حرکتمی کند، در حالی که \overline{MF} هنوز افت ولتاژ روی Z را بیانمی کند و هیچ ارتباطی با مقاومت خطا ندارد. نقطه C محل تقاطع امتداد خط جریان اندازه گیری شده I_n و خط \overline{MF} است.

$$\begin{cases} \left| \overrightarrow{OA} \right| = \left| \dot{U}_m \right| \cos(\varphi) \\ \left| \overrightarrow{MA} \right| = \left| \dot{U}_m \right| \sin(\varphi_{ui} + 90^\circ - \varphi_{line}) \\ \left| \overrightarrow{FA} \right| = \left| \dot{U}_m \right| \cos(\varphi_{ui} + 90^\circ - \varphi_{line}) \tan(90^\circ - \varphi) \\ \left| \overrightarrow{MF} \right| = \left| \overrightarrow{MA} \right| - \left| \overrightarrow{FA} \right| = \left| \dot{U}_m \right| \sin(\varphi_{ui} + 90^\circ - \varphi_l) \\ \left| \dot{U}_m \right| \cos(\varphi_{ui} + 90^\circ - \varphi_{line}) \tan(90^\circ - \varphi_{line} - \gamma) \end{cases}$$
(7)

که φ_{ui} اختلاف زاویه بین ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در نقطه رله است. با اعمال $|\vec{MF}| = |\dot{I}_m \times Z|$ در شکل (۳)، معادله افت ولتاژ بهدست می آید:

$$\begin{split} |\dot{I}_{m}||Z| &= |\dot{U}_{m}|\sin(\varphi_{ui} + 90^{o} - \varphi_{line}) \\ &- |\dot{U}_{m}|\cos(\varphi_{ui} + 90^{o} - \varphi_{line}) \\ &- \varphi_{line})\tan(90^{o} - \varphi_{line} - \psi) \\ &= \frac{\sin(\varphi_{ui} + \psi)}{\cos(90^{o} - \varphi_{line} - \psi)} \end{split}$$
(f)

از رابطه (۴) داریم:

$$|Z| = |Z_m| \frac{\sin(\varphi_{ui} + \psi)}{\cos(90^o - \varphi_{line} - \psi)}$$
(Δ)

با توجه به رابطه (۵)، معیار حفاظت دیسیتانس برای خطوط
جمعکننده مزرعه بادی بهصورت زیر تعریفمی شود:
$$|Z_m| \le k_a |Z_{set}|$$
 In – zone fault
 $|Z_m| > k_a |Z_{set}|$ Out – of – zone fault (۶)

که Z_{m} امپدانس اندازه گیری شده است. Z_{set} مرز محدوده تنظیم حفاظتی است. k_a مریب تنظیم تطبیقی و برابر با $\frac{(\varphi_{00}-\varphi_{00}-\varphi_{00})}{\sin(\varphi_{ui}+\psi)}$ حفاظتی است. ϕ_{ui} می کننده تحت حافظت و φ_{ui} است. اختلاف اختلاف زاویه بین ولتاژ و جریان اندازه گیری شده است. ψ اختلاف زاویه ای بین جریان اندازه گیری شده \dot{I}_m و ولتاژ نقطه خطا \dot{U}_f است. نحوه تخمین ψ در بخش بعدی آمده است.

بنابراین امپدانس تطبیقی z_a با توجه به رابطه زیر ، برابر با اندازهی k_a امپدانس دیده شده در نقطه رله ($|Z_m|$) تق سیمبر ضریب تطبیقی است، بهعنوان امپدانس معیار رسایش در نظر گرفتهمی شود.

$$\begin{cases} z_{a} = \frac{|Z_{m}|}{k_{a}} \leq |Z_{set}| & In - zone \ fault \\ z_{a} = \frac{|Z_{m}|}{k_{a}} > |Z_{set}| & Out - of - zone \ fault \end{cases}$$
(Y)

ψ اندازه گیری زاویه انحراف. 1. ۲

برای بررسی حفاظت دیستانس تطبیقی برای خط جمع کننده در مزارع بادی، ابتدا باید اختلاف زاویه ای ψ میان جریان اندازه گیریشده I_m و ولتاژ نقطه خطا \dot{U}_f محا سبه شود. با توجه به این که مقاومت خطا از نوع مقاومتی خالص ا ست لذا فرض شده که ولتاژ نقطه خطا همفاز با جریان اتصال کوتاه است. به عبارت دیگر، ψ برابر اختلاف زاویه ای بین جریان اندازه گیری شده و جریان اتصال کوتاه است درنتیجه برای خطای تکفاز داریم:

$$\dot{I}_f = 3\dot{I}_{f0} = 3\dot{I}_{f2} \tag{(A)}$$

که \dot{I}_{f2} و \dot{I}_{f0} به ترتیب بیانکننده جریان توالی منفی و جریان توالی صفر در نقطه خطا میبا شند. بنابراین، مطابق رابطه (۸)، زاویه ψ بهصورت زیر محاسبهمیشود:

$$\psi = \arg\left(\frac{\dot{l}_m}{\dot{l}_f}\right) = \arg\left(\frac{\dot{l}_m}{\dot{l}_{f0}}\right) = \arg\left(\frac{\dot{l}_m}{\dot{l}_{f2}}\right) \tag{9}$$



شکل ۴: شبکه توالی صفر معادل هـنـگـا م وقوع خطای تک فاز به زمین در خط جمع کننده

در شکل (۴)، α برابر در صد فا صله از نقطه ی خطای F تا سمت سیستم جمع کننده نسبت به کل طول خط است. Z_{L0} امپدانس توالی صفر خط است Z_{N0} و Z_{N0} به ترتیب امپدانس معادل توالی صفر سمت سیستم قدرت و سمت سیستم جمع کننده است. با توجه به شکل بالا بین جریان توالی صفر در نقطه خطا f_{f0} و جریان توالی صفر در نقطه را د است. (۱۰) برقرار می اشد:

$$\dot{I}_{m0} = C_{m0}\dot{I}_{f0} = \frac{Z_{N0} + (1 - \alpha)Z_{L0}}{Z_{M0} + Z_{N0} + Z_{L0}}\dot{I}_{f0}$$
(1.)

در رابطه (۱۰)، *C*_{m0} ضریب توزیع جریان توالی صفر میبا شد. در سیستم جمع کننده با توجه به این که زاویه امپدانس توالی صفر سیستم هیچ ارتباطی با بار ندارد لذا به صورت یک عدد حقیقی در نظر گرفته می شود. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که زاویه جریان توالی صفر در نقطه رله تقریباً مشابه زاویه جریان توالی صفر در نقطه خطا است. بنابراین زاویه انحراف در رابطه (۹) را می توان به صورت زیر اصلاح نمود:

$$\psi = \arg\left(\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_{m0}}\right) \tag{11}$$

با توجه به معادلات بالا زاویه انحراف ψ فقط به جریان توالی صفر و جریان اندازه گیری شده در نقطه رله وابسته است. درنتیجه با محاسبه $k_a |Z_{set}|$ (۶) مقدار تنظیم حفاظت دیستانس تطبیقی در رابطه (۶) ا میتوان به معیار حفاظت، مکان خطا میتواند مشخص شود.

۴. مطالعات عددی

برای بررسی کارایی طرح حفاظت دیستانس پیشنهادی، یک مزرعه بادی DFIG مطابق شکل (۵) از اتصال چند توربین بادی DFIG تشکیل شده است، برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است. در مزرعه بادی موردمطالعه، هر خط جمع کننده به ۱۰ عدد DFIG به صورت

موازی متصل شدهاست و توان تولیدی آنها را به باس ۳۵ کیلوولتی، با نام 35kVBus راه انتقالمیدهد.



شكل ۵: مدل شبيهسازي مزرعه بادي

در شـــبکه موردمطالعه بالا، خط جمع کننده موردمطالعه در این مقاله خط شـــماره ۱ اســت که دیاگرام شــبیهسـازی آن در محیط Simulink نرمافزار MATLAB در شکل (۶) نشان دادهشده است.



شکل ۶: شبیهسازی خط جمع کننده شماره ۱

پارامترهای اصلی DFIG، ترانسفورماتور اصلی و خطوط جمع کننده ۳۵ کیلوولتی که در مدل شـبیهسـازی اسـتفادهشـده، در جدول(۱) آمدهاست.

مقدار	کمیت	رديف
۱/۵ مگاوات	توان نامی هر DFIG	١
۶۹۰ ولت	ولتاژ نامی استاتور	٢
۱۰ کیلومتر	طول خط جمع كننده	٣
۰/۰۰۲۰۶pu	مقاومت استاتور	۴
۰/۰۰۵pu	مقاومت روتور	۵
۵۰ هرتز	فرکانس نامی شبکه	۶
۲/۹pu	اندوكتانس مغناطيس كننده	٧
۳۵ کیلوولت	ولتاژ سمت فشار متوسط	٨
•/\Y\pu	راكتانس نشتى استاتور	٩
۰/۱۵۶pu	راكتانس نشتى روتور	۱.

جدول ۱: پارامترهای اصلی DFIG

حد رسایل ناحیه اول رله دیستانس برابر ۹۰ درصد طول خط یعنی برابر Zset=8.04 Ohm در نظر گرفتهشده است.

در ابتدا عملکرد حالت عادی مزرعه بادی شبیه سازی خواهد شد و در ادامه عملکرد سیستم حفاظت دیستانس پیشنهادی، در حضور

مقاومت های مختلف خطا و در نقاط مختلف خط جمع کننده، ارزیابی خواهدشد.

۴. ۱. عملکرد عادی مزرعه بادی

در حالت عملکرد عادی فرض بر این است که باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه میوزد و ولتاژ سیستم قدرت، که مزرعه بادی به آن متصل است، در مقادیر نامی خود قراردارند. در این حالت بعد از عبور حالتهای گذرا در ابتدای شبیهسازی (تا ۰/۱ ثانیه ابتدای شبیهسازی)، مقادیر این ولتاژها



شکل ۷: ولتاژ باس ۳۵ کیلوولتی متصل به سیستم قدرت و باس ۶۹۰ ولتی متصل به DFIG در حالت عادی

در این سناریو، و ضعیت ولتاژی شبکه در حالت عادی قرار دارد و مزرعه بادی با ضریب توان یک در مدار است. سرعت نامی مزرعه ۱۴ متر بر ثانیه فرض شده و در این شبیه سازی فرض شده باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه میوزد. با این سرعت وزش باد، مزرعه بادی حدود ۱ مگاوات توان اکتیو را از طریق باس ۳۵ کیلوولتی به شربکه تزریق میکند.

DFIG ها توسط سیستم کنترل MPPT (ردیاب نقطه توان حداکثر) به گونهای کنترل می شوند که حداکثر توان ممکن را از باد دریافت کنند[۲۳]. در این حالت، میزان توان اکتیو و راکتیو تولید شده تو سط مزرعه بادی که از طریق شین ۳۵ کیلوولتی به سیستم قدرت تزریق می شود در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: تـو ۱ ن اکتیو و راکتیو تولیدشده توسط DFIG های متصل به خط جمعکننده در حالت عادی

در این مطالعات سرعت روتور به حدود ۰/۸ پریونیت ر سیدها ست طبق شکل (۹) DFIG ها ۶ قطب (۳ عدد زوج قطب) هستند و سرعت نامی آنها برابر ۱۰۰۰ دور بر دقیقه (1000 rpm = 1005) می باشد.



شکل ۹: سرعت چرخش DFIG متصل به توربین بادی در حالت عادی

در هنگام عملکرد عادی مزر عه بادی، جریان خط جمع کننده در حد مجاز خود قراردارد که این جریان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این حالت، میزان امپدانس دیده شده توسط رله در شکل (۱۱) نشان داده شده است. امپدانس دیده شده از نقطه رله بالاتر از حد ر سایش رله (Zset=8.04 Ohm) است و رله دیستانس به در ستی عدم وقوع خطا را تشخیص می دهد. اگر امپدانس دیده شده زیر حد Zset برود، رله دیستانس فرمان قطع را صادر خواهد کرد.



در بخش بعدی، مزرعه بادی در حضور خطاهای اتصال کوتاه شبیهسازی خواهدشد.

۴. ۲. شرایط وقوع خطا

در این بخش عملکرد مزرعه بادی در دو حالت با حضور حفاظت دیستانس سنتی و با حضور حفاظت دیستانس پیشنهادی شبیهسازی شدهاست.

٤. ٢. ١. حفاظت ديستانس سنتى

در این حالت، یک خطای اتصال کوتاه در ۲/۵ کیلومتری از محل نصب رله دیستانس در خط جمعکننده و در زمان t=0.5 ثانیه رخمیدهد. در اثر این خطا فاز A به زمین اتصال کوتاه می شود. هدف بررسی اثر مقاومت خطا بر امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس است.

در این حالت، ضریب تطبیقی k_a که در رابطه (۶) تعریف شده وجود ندارد و برابر ۱ در نظر گرفته شده است. اندازه مقاومت در نظر گرفته شده برای ناحیه حفاظتی اول رله دیستانس برابر ۸/۰۴۸ اهم است که ۹۰ درصد خط جمع کننده را پوشش می دهد. بنابراین، اگر اندازه امپدانس دیده شده در نقطه رله کمتر از ۸/۰۴۸ اهم شود، رله دی ستانس فرمان قطع را صادر خواهد کرد. ابتدا فرض می شود مقاومت خطا برابر ۲/۰ اهم است. در اثر این خطای اتصال کوتاه که در زمان



a شکل ۱۲: تغییرات ولتاژ باسهای مزرعه بادی در اثر اتصال کوتاه فاز به زمین در *1*.5*±* ثانیه

از آنجاکه خطای تک فاز به زمین نامتقارن است، باعث افزایش ولتاژ دو فاز d و c در باس ۳۵ کیلوولتی شده و ولتاژ فاز خطا دیده a نیز به شدت کاه شیافته است. این خطا ولتاژ شین ۶۹۰ ولتی DFIG ها را نیز تحت تأثیر قرارداده است. در اثر این خطای اتصال کوتاه، توان اکتیو و راکتیو تولیدی مزرعه بادی، سرعت روتور DFIGها دچار نوسانات شدید می شود. (شکل های ۱۳ تا ۱۴)





شکل ۱۴: تغییرات سرعت DFIG هـا ی مزرعه بادی در اثر اتصال کوتاه فاز *a* به زمین در 5. *t* = 1 ثانیه

همان طور که مشاهدهمی شود، در اثر وقوع این خطا سرعت روتور افزایشیافته زیرا DFIG نمی تواند انرژی جذبشده از باد را به صورت انرژی الکتریکی به سیستم تحویل دهد و این انرژی باعث افزایش سرعت چرخش روتور می شود. در اثر وقوع اتصال کوتاه در زمان t=0.5 ثانیه، جریان عبوری از خط جمع کننده دچار نوسانات شدید می شود. (شکل (۱۵)، جریان فاز a به زمین ات صال کوتاه می شود. مطابق شیکل (۱۵)، جریان فاز a در اثر به بیش از ۲/۵ پریونیت می سد. که افزایش جریان این فاز، از دو فاز b و ع بیشتر است. جریان فاز b و ع در اثر این اتصال کوتاه به حدود ۲/۸ پریونیت می رسد که افزایش دامنه جریان فاز c ای فاز است.

دامنه بالای جریان اتصال کوتاه به تجهیزات مزرعه بادی آسیب



همچنین عملکرد رله دیستانس در این حالت در شکل (۱۶) نشان دادهشده است.



شکل ۱۶: تغییرات زمانی امپدانس در اثر وقوع خطا در ۲/۵ کیلومتری مکان رله با R_g = 0.2 اهم

در اثر این خطا، اندازه امپدانس دیدهشده توسط رله به زیر حد رسایش ناحیه ۱، یعنی ۸/۰۴۸ اهم، میرسد و رله دیستانس سنتی فرمان قطع را صادرمی کند.

اگر مقاومت خطا تغییر کند، رله دیستانس غیر تطبیقی امپدانس متفاوتی را نشان خواهد داد. در شاکل های (۱۷) و (۱۸) تغییرات امپدانس دیدهشده توسط رله دیستانس در اثر مقاومت خطای ۱/۲ و ۵/۲ اهم بهعنوان نمونه نشان دادهشده است.







شکل ۱۸: تغییرات زمانی امپدانس در اثر وقوع خطا در ۲/۵ کیلومتری مکان رله با 2.5 R_g هم

برر سی نتایج نشانمی دهد که، میزان مقاومت خطا بر عملکرد رله اثر دارد. به این تر تیب که به ازای $R_g = 0.2$ مقدار امپدانس دیده شده به $Z_m = 0.0682$ اهم میرســـد و در هنگام $R_g = 5.2$ بـه $R_g = 0.19740$ اهم میرسد.

بنابراین، در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه، امپدانس دیدهشده توسط رله دچار تغییر می شود که این تغییرات در شکلهای (۱۶) تا (۱۸) به ترتیب برای مقاومت خطا ی (Rg) ۲/۰، ۱/۲ و ۵/۲ اهم نشان داده شده است. اثر مقاومت خطا بر اندازه امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس معمولی، در رابطه (۳)، از نظر تئوری ریاضی نیز اثبات شده است. بنابراین، حفاظت دیستانس سنتی نمی تواند مکان دقیق خطا را نشان دهد و تغییرات مقاومت خطا (Rg) باعث تغییر امپدانس دیده شده در نقطهی رله (Zm) می گردد.



امپدانس دیدهشــده توســط رله دیســتانس ســنتی، در ازای مقاومتهای مختلف خطا، در شکل (۱۹) با هم مقایسه شدهاست.

شکل ۱۹: تغییرات امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس سنتی در اثر وقوع خطا در ۲/۵ کیلومتری مکان رله با امپدانسهای مختلف خطا

با توجه به نتایج مشاهدهمیشود که، با افزایش مقاومت خطا، امپدانس دیدهشده توسط رله نیز افزایش می یابد. بنابراین تغییر مقاومت خطا، تشخیص مکان وقوع خطا در رلههای دیستانس معمولی را با خطا مواجهمیکند.

در شکل (۲۰)، مقاومت خطا برابر ۱/۲ اهم ثابت در نظر گرفته شده و مکان وقوع اتصال کوتاه در طول خط جمع کننده جابجا شدها ست. (شکل(۲۰)



شکل ۲۰: تغییرات امپدانس دیدهشده توسط رله دیستانس سنتی در اثر وقوع خطا در مکانهای مختلف با مقاومت خطای ثابت ۱/۲ اهم

با توجه به نتایج، امپدانس دیدهشده در خطایی که در فاصله ۹۰ درصدی طول خط از مکان ر له رخمید هد، برابر ۰/۲۵۲۸ اهم و امپدانس دیدهشده در خطایی که در فاصله ۲۵ درصدی رخمیدهد، برابر ۰/۰۸۱۰۳ اهم است. بنابراین با دور شدن خطا، امپدانس دیدهشده توسط رله دیستانس نیز بیشتر می شود و در صورت به کارگیری حفاظت دیستانس سنتی، با تغییر مقاومت خطا، مکان خطا اشتباه تشخیص داده خواهدشد.

۴. ۲. ۲. با حضور حفاظت دیستانس پیشنهادی

در اینحالت، ضریب تطبیقی بهعنوان معیار تطبیقی، در روش پیشنهادی استفاده شدهاست. با در نظر گرفتن ضریب تطبیقی ka، امپدانس تطبیقی دیدهشده در مکان رله بهعنوان امپدانس معیار جهت حفاظت دیستانس به کارمیرود. ابتدا تغییرات امپدانس تطبیقی دیدهشده در اثر وقوع خطا، در یک مکان ثابت، به ازای تغییرات مقاومت خطا، بررسی خواهدشد. برای این منظور، تغییرات امپدانس za در حالت وقوع خطا در ۲۵ درصد ابتدای خط در شکل (۲۱) نشان دادهشده است.





نتایج مطالعه در این بخش نشانمیدهد که، مقاومت خطا اثری بر اندازه امپدانس تطبیقی (z_a) دیدهشده در مکان رله ندارد. بنابراین روش حفاظت دیستانس تطبیقی پیشنهادی عملکرد بسیار عالی در از بین بردن اثر مقاومت خطا بر عملکرد رله دارد. با توجه به شـکل (۲۱) امپدانس تطبیقی دیدهشده هنگام وقوع خطا با مقاومت خطای ۸ اهم با امپدانس های تطبیقی دیده شده در مقاومت های خطای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ اهم برابر است. این برابری، کار آیی بسیار مؤثر روش حفاظت دیستانس تطبیقی پیشنهادی در تعیین مکان دقیق خطا، صرفنظر از مقاومت خطا را نشانمیدهد.

در شـکل (۲۲)، مکان وقوع خطای تکفازی به زمین از ۲۵ درصـد طول خط به ۵۰ درصد طول خط جابجا شدهاست.



شکل ۲۲: تغییرات امپدانس تطبیقی دیده شده توسط رله دیستانس ییشنهادی در اثر وقوع خطا در ۵ کیلومتری (۵۰ درصد طول خط) مكان رله با مقاومتهای خطای مختلف

بررسی نتایج در این حالت، نشان می دهد تغییرات مقاومت خطا از ۸ اهم تا ۳۰ اهم، اثر بسیار ناچیزی در امپدانس تطبیقی (z_a) دیدهشده توسط رله دیستانس پیشنهادی دارد و در همه این موارد، میزان امپدانس دیدهشده بعد از وقوع خطا حدود ۰/۳۲ اهم است.

تغییرات امپدانس تطبیقی (z_a) دیدهشده توسط رله دیستانس تطبیقی در اثر تغییرات مقاو مت خطا در هنگام وقوع خطا در ۷/۵ کیلومتری خط جمع کننده (۷۵ درصد طول خط) در شکل (۲۳) نشان دادهشده است.



شکل ۲۳: تغییرات امپدانس تطبیقی دیده شده توسط رله دیستانس پیشنهادی در اثر وقوع خطا در ۷/۵ کیلومتری (۷۵ درصد طول خط) مكان رله با مقاومتهای خطای مختلف

در این حالت، اندازه امپدانس تطبیقی از دید رله دیستانس تطبیقی پیشنهادی در کلیه مقاومتهای خطا (۸، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ اهم) حدود ۳/۳ اهم است.

با بررسی نتایج سه حالت مختلف در شکلهای (۲۱) تا (۲۳)، حفاظت دیستانس پیشنهادی تنها به مکان خطا حساس است و تغییرات مقاومت خطا اثری بر عملکرد آن ندارد.

در این حالت نیز برای اثبات عملکرد درست روش پیشنهادی مقاومت خطا ثابت در نظر گرفته شده و مکان وقوع خطا در طول خط جمع کننده مزرعه بادی جابجا شده است. اندازه امپدانس تطبیقی دیده توسط حفاظت دیستانس پیشنهادی در این حالت، در شکل (۲۴) نشان دادهشده است.

- J. J. Justo, F. A. Mwasilu, "Low voltage ride through enhancement for wind turbines equipped with DFIG under symmetrical grid faults", Tanzania Journal of Engineering and Technology, vol. 2, pp. 1631-1639, 2019.
- [2] S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", IEEE Industry applications magazine, vol. 3, pp. 26-33, 2002.
- [3] A. Hooshyar, M. A. Azzouz, E. F. El-Saadany, "Distance protection of lines emanating from full-scale converterinterfaced renewable energy power plants-Part I: Problem statement", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, pp. 1770-1780, 2014.
- [4] W. Lin, D. Jovcic, "Power balancing and dc fault ride through in DC grids with dc hubs and wind farms", IET Renewable Power Generation, vol. 7, pp. 847-856, 2015.
- [5] M. M. Eissa, "Ground distance relay compensation based on fault resistance calculation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, pp. 1830-1835, 2006.
- [6] Z. Y. Xu, G. Xu, L. Ran, S. Yu, Q. X. Yang, "A new faultimpedance algorithm for distance relaying on a transmission line", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, pp. 1384-1392, 2010.
- [7] A. G. Jongepier, L. Van Der Sluis, "Adaptive distance protection of double-circuit lines using artificial neural networks", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, pp. 97-105, 1997.
- [8] M. M. Eissa, M. Masoud, "A novel digital distance relaying technique for transmission line protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, pp. 380-384, 2001.
- [9] R. Dubey, S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, V. G. Venkoparao, "Extreme learning machine based adaptive distance relaying scheme for static synchronous series compensator based transmission lines", Electric Power Components and Systems, vol. 2, pp. 219-232, 2016.
- [10] H. Zhang, R. Che, "Fault cause identification based on characteristics of transition resistances for transmission lines", In 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), vol. 2, pp. 1405-1409., 2015.
- [11] V. H. Makwana, B. Bhalja, "Distance Relaying Algorithm for a Line-to-ground Fault on Single Infeed Lines", Electric Power Components and Systems, vol. 12, pp. 1227-1238, 2014.
- [12] M. Sarkar, M. Altin, P. E. Sørensen, A. D. Hansen, "Reactive Power Capability Model of Wind Power Plant Using Aggregated Wind Power Collection System", Energies, vol. 12, pp. 2-19, 2019.
- [13] K. Jia, Y. Li, Y. Fang, L. Zheng, T. Bi, Q. Yang, "Transient current similarity based protection for wind farm transmission lines", Applied energy, vol. 1, pp. 42-51, 2018.
- [14] J. Yang, J. E. Fletcher, J. O'Reilly, "Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design", IEEE transactions on power delivery, vol. 4, pp. 2308-2318, 2010.
- [15] S. J. Haslam, P. A. Crossley, N. Jenkins, "Design and evaluation of a wind farm protection relay", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 1, pp. 37-44, 1999.
- [16] A. Moradi, Y. Alinejad-Beromi, K. Kiani, "Application of grey wolf algorithm for multi-year transmission expansion planning from the viewpoint of private investor considering fixed series compensation and uncertainties",



شکل ۲۴: تغییرات امپدانس تطبیقی دیدهشده توسط حفاظت دیستانس پیشنهادی در اثر وقوع خطا در مکانهای مختلف با مقاومت خطای ثابت ۳ اهم

از نتایج شـــبیهســـازی و اثر تغییر مکان وقوع خطا بر امپدانس تطبیقی، برمیآید که با افزایش فاصــله وقوع خطا، امپدانس تطبیقی دیدهشده در مکان رله نیز بزرگتر میشود.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، یک طرح جدید برای بهبود عملکرد حفاظت دیستانس در خطوط جمع کننده مزرعه بادی DFIG پیشنهادشده است. برای این منظور، ابتدا معادله افت ولتاژ از نقطه رله تا نقطه خطا تعیینشده و در ادامه بر اساس آن ضریب تنظیم تطبیقی محاسبه شده است. بر این اساس، معیار حفاظت دیستانس تطبیقی جدیدی بر اساس زاویه میان جریان خطا و جریان اندازه گیری شده، شکل گرفته است. آزمون شبیه سازی بر روی یک مزرعه بادی در محیط MATLAB نشانمی دهد که طرح حفاظت پیشنهادی تطبیقی است و ضریب تنظیم میتواند بهطور تطبیقی با اندازه گیریها تنظیم شود، طوری که حفاظت دیستانس بهخوبی با تغییرات حالتهای بهرهبرداری سازگار شود. معیار حفاظت هیچ ارتباطی با مقاومت خطا ندارد، بنابراین طرح حفاظت پیشنهادشده تحت تأثير مقاومت خطا قرارنمی گیرد، و عملکرد بهتری نسبت به حفاظت دیستانس سنتی دارد. ازجمله ویژگیهای طرح پیشنهادی می توان به قابلیت وفق پذیری (سازگاری)، عدم تأثیر پذیری از مقاومت خطا، مناسب برای سیستم تغذیهی ضعیف اشارهکرد. درنهایت، طرح حفاظت دیستانس تطبیقی با حفاظت دیستانس سنتی مقایسهشده که نتایج شبیهسازی، برتری و کارایی طرح حفاظت دیستانس پیشنهادی در حفاظت از خطوط جمع کننده بادی را نشانمیدهد.

International Transactions on Electrical Energy Systems, https://doi.org/10.1002/etep.2702.

- [17] A. Moradi, Y. Alinejad Beromi, K. Kiani, Z. Moravej, " Artificial Intelligence Based Approach for Identification of Current Transformer Saturation from Faults in Power Transformers", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 3, pp. 37-46, 2014.
- [18] A. Moradi, M. Ordouei, S. M. R. Hashemi, "Multi-period generation-transmission expansion planning with an allocation of phase shifter transformers", Int. J. Nonlinear Anal. Appl., https://doi.org/10.22075/IJNAA.2023.23005.4470.
- [19] P. Nazarian, M. Moradlou, "Estimation of Flicker Generating Feeders Index with Combined Sampling-Simulation Method", Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS), vol. 4, no. 4, pp. 37-43, 2023.
- [20] K. Sabzevari, " Power Sharing Between Islanded Microgrid Inverters by Modifying the Droop Control Method", Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS), vol. 3, no. 4, pp. 43-49, 2022.
- [21] D. Jones, J. J. Kumm, "Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements", IEEE transactions on industry applications, vol. 2, pp. 1385-1390, 2013.
- [22] G. Quinonez-Varela, G. W. Ault, O. Anaya-Lara, J. R. McDonald, "Electrical collector system options for large offshore wind farms", IET Renewable Power Generation, vol. 2, pp. 107-114, 2007.
- [23] H. Bastami, A. H. Abolmasoumi, A. A. Ghadimi, "Stator voltage fault detection and optimal rotor current limiting in doubly fed induction generators", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 5, pp. 1242-1251, 2017.