



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2025) 4(2):103-118

## Presenting a New Pilot Protection Plan for Transmission Lines in Green Energy Networks with Renewable Energy Sources Such as Wind Turbines

Afshin Hosseini<sup>1</sup>, M.Sc, Reza Eslami<sup>1</sup>, Associate Professor<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

### Abstract:

Transmission lines play a critical role in power systems as they provide the pathway for transferring the power from the generation to the consumption. The probability of faults occurring in transmission lines, especially in the presence of distributed generations (DGs), is significantly high. Nowadays, the presence of DG sources, in addition to the advantages it has, also causes changes in the behavior of various parts of power systems, including the protection system. These changes include increased short-circuit current levels and incorrect operation of the zone 3 of the distance relay during load interferences. This paper presents a new pilot impedance-based algorithm using positive, negative, and zero sequences components of the phasors of the voltage and the current of the two buses located at the beginning and the end of lines in the presence of wind turbines with a production capacity of 2.5 MW. This algorithm has been tested on the IEEE 39-bus test system in the DIgSILENT software. The said pilot impedance determines the fault detection criteria against all types of faults, the location of faults, load interferences and power swings.

**Keywords:** Transmission lines, Load interference, Distance relay, Wind turbine, Pilot impedance.

**Received:** 21 May 2024

**Revised:** 25 June 2024

**Accepted:** 14 August 2024

**Corresponding Author:** Dr. Reza Eslami, [eslami@sut.ac.ir](mailto:eslami@sut.ac.ir)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1123984>



## ارایه طرح حفاظتی پایلوت جدید برای خطوط انتقال در شبکه های انرژی سبز دارای منابع تجدیدپذیر انرژی از نوع توربین بادی

افشین حسینی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، رضا اسلامی<sup>۱</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

**چکیده:** خطوط انتقال نقش حیاتی در سیستم های قدرت دارد زیرا مسیری برای انتقال توان بین تولیدکننده و مصرف کننده را تامین می کند. احتمال وقوع خطا در خطوط انتقال بخصوص در حضور تولیدات پراکنده بسیار بالا است. امروزه وجود منابع تولیدات پراکنده علاوه بر مزایایی که دارد باعث تغییراتی در رفتار بخش های مختلف سیستم های قدرت از جمله سیستم حفاظتی شده است. این تغییرات شامل افزایش سطح جریان اتصال کوتاه و عملکرد نادرست زون ۳ رله دیستانس در هنگام تداخل بار می شود. در این مقاله با استفاده از مولفه های توالی مثبت، منفی و صفر فازور ولتاژ و جریان دو باس ابتدا و انتهای خطوط، الگوریتم جدیدی مبتنی بر امیدانس پایلوت در حضور تولیدات پراکنده از نوع توربین بادی ارایه شده است که توان هر کدام از توربین های بادی ۲/۵ مگاوات است. این الگوریتم در سیستم ۳۹ باسه IEEE در نرم افزار DigSILENT آزمایش شده است. امیدانس پایلوت مذکور معیار تشخیص خطا را در برابر انواع خطا، مکان وقوع خطا، تداخل بار و نوسان توان تعیین می کند.

**واژه های کلیدی:** خطوط انتقال، تداخل بار، رله دیستانس، توربین بادی، امیدانس پایلوت.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

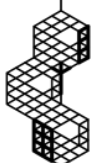
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

نویسنده ی مسئول: دکتر رضا اسلامی، eslami@sut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1123984>



با توجه به گستردگی شبکه سیستم قدرت، ساختار شبکه خیلی پیچیده شده است. بنابراین طرح‌های حفاظت مرسوم بستگی به سیگنال‌های محلی روی عملکرد برخی چالش‌ها مانند حساسیت کم، تنظیم مقدار پیچیده و زمان عملکرد طولانی دارد. با این حال ممکن است خطای داخلی را حین بارگذاری سنگین تشخیص ندهد و باعث می‌شود تارپیل‌های پی‌درپی رخ دهد و شاهد مقیاس بزرگ خاموشی باشیم [۱-۳]. با توسعه سریع و کاربرد گسترده‌ای از تکنولوژی ارتباطات و سیستم اندازه‌گیری گسترده<sup>۱</sup>، زمان واقعی داده‌های فازوری سنکرون بطور گسترده در حفاظت پایلوت و کنترل سیستم قدرت استفاده شده است [۴-۶]. بنابراین، ناحیه وسیع پشتیبانی حفاظت<sup>۲</sup> از اطلاعات چند منبع برای شناسایی خطا برای بهبود قابلیت پشتیبانی حفاظت مرسوم، برای کاهش تنظیم و ترتیب‌بندی حفاظت، و جلوگیری از خاموشی فاجعه‌انگیز پیشنهاد شده است [۷-۹]. چند منبع اطلاعاتی برای تشخیص خطای قابلیت اطمینان و تنظیمات مربوط به حفاظت خط و جلوگیری از فاجعه‌بار خاموشی در تحقیقات سه دسته وجود دارد. دسته اول از کمیت‌های الکتریکی استفاده می‌کنند، به این طریق که وقتی خطی باعث خطا می‌شود از اختلاف بین توالی مثبت زاویه جریان در دو طرف ترمینال مشخص می‌شود. طرح برپایه مولفه‌های توزیع ولتاژ در مرجع [۱۰] ارایه شده است. در مرجع [۱۱] معیار حفاظت مانند نسبت جمع مولفه توان مختلط دو طرف خط است. با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده<sup>۳</sup> در شبکه انتقال اگرچه استقرار آن‌ها همیشه در حال رشد است، اما چالش‌های متعددی برای حفاظت وجود دارد، مانند [۱۲] که با استفاده از خازن‌های سری شده با تریتستور<sup>۴</sup> برای اینکه روی عملکرد رله دیستانس تاثیر نگذارد، از روش نمایه نظاره‌گرا<sup>۵</sup> از جریان‌های سه‌فاز اندازه‌گیری شده در محل رله برای تشخیص خطا بدست می‌آید و ماشین بردار پشتیبان به کمک بیشتر برای طبق‌بندی بکار می‌رود. در [۱۳] گزارشی از تحقیقات در زمینه‌های مربوط به مدیریت خطا از جمله تشخیص خطا، مکان‌یابی و شناسایی ارایه شده است. دسته‌ی دوم مبتنی به وضعیت عملیات رله‌ها و بریکرها است. بعضی از روش‌های هوش مصنوعی برای تشخیص عنصر خطا مانند شبکه‌های پتری. دسته‌ی سوم مبتنی بر ترکیب حالت ۱ و ۲ یعنی وضعیت عملیات رله و کمیت‌های الکتریکی است [۱۴-۱۸]. دسته‌ی سوم مبتنی بر ترکیب حالت ۱ و ۲ یعنی وضعیت عملیات رله و کمیت‌های الکتریکی است. طرح حفاظت بسته به فازور جریان و وضعیت‌های عملیاتی فاصله حفاظتی ناحیه سه در مرجع [۱۷] عمل می‌کند از حفاظت جریان تفاضلی بعنوان گسترده برای حفاظت اصلی خط انتقال با ولتاژ بالا استفاده می‌شود اما، می‌تواند تحت تاثیر جریان اشباع ترانسفورماتور جریان<sup>۶</sup> قرار گیرد و منجر به افت ولتاژ ناشی از خطای خارجی شود [۱۸]. همچنین برای اینکه طرح حفاظت تحت تاثیر جریان شارژ تولید شده توسط خازن‌های توزیع شده بدون خطا و شرایط خطای خارجی برای خطوط طولانی است در [۱۹] از معیار حفاظتی پایلوت براساس پارامتر C محاسبه شده خط انتقال ارایه می‌کند اما در این معیار تاثیر تولیدات پراکنده از نوع بادی در نظر گرفته نشده است. معیار حفاظت برای جریان تفاضلی همان حالت یک در سطح گسترده مشکلاتی دارد [۲۰]. بعضی از حفاظت‌های امپدانس پایلوت برای پوشش این مشکل مطرح شده است. امپدانس یکپارچه بعنوان نسبت جمع دو ولتاژ پایانی به نسبت جمع دو جریان پایانی در مراجع [۲۱، ۲۲] تعریف می‌شود. امپدانس حفاظت زاویه فاز توالی مثبت از امپدانس یکپارچه در [۲۳] را عنوان می‌کند. امپدانس تفاضلی افزایشی خط انتقال بعنوان طرح حفاظت پایلوت در [۲۴] مطرح می‌شود. به هر حال براساس طرح حفاظت نواقصی دارد. طرح‌های حفاظت تحت تاثیر امپدانس منابع خارجی قرار گرفته بودند تنظیمات آستانه پیچیده می‌شود. حفاظت امپدانس تفاضلی برای خطا در وسط خط در [۲۵] از بین رفته است. حفاظت پایلوت برپایه‌ی تغییر محاسبات ادیتمانس خط شنت حین شرایط عملکرد پویا با استفاده از داده‌های فازوری سنکرون طبق [۲۶] است. الگوریتم پیشنهادی برای هر توپولوژی خط از طریق چندین شبیه‌سازی خطا، و همچنین خطاهایی با مقاومت بالا، نویزهای نمونه‌برداری شده ناهماهنگی بین نمونه‌ها، اشباع ترانسفورماتور جریان و همچنین نوسان توان شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است [۲۷]. نویسندگان در مورد امپدانس یک‌طرفه، امپدانس براساس خطایاب خطوط انتقال با استفاده از توپولوژی خط در [۲۸] بحث کرده‌اند می‌توان از روش ترکیب منطق فازی با سری فوریه سریع<sup>۷</sup> برای تشخیص خطا در شبکه انتقال استفاده شده است [۲۹]. به هر حال اثرات داده‌های فازوری غیرسنکرون در هر دو پایانه خط در ادبیات موجود در نظر نگرفته شده است. در [۳۰] با استفاده مولفه امپدانس تحمیلی که که می‌تواند خطاهای داخلی را از خطاهای خارجی به صورت دقیق و سریع در کم‌تر از یک چرخه تشخیص دهد؛ آستانه مورد استفاده در طرح حفاظتی پیشنهادی به صورت تطبیقی به روز رسانی می‌شود که حفاظت قوی را در احتمالات مختلف شبکه به دست می‌دهد؛ مسائل مربوط به حفاظت از راه دور متداول مانند مقاومت خطا، ساختار شبکه، جهت جریان توان<sup>۸</sup>، جریان تغذیه، جبران‌سازی سری و قدرت توان (که در [۳۱] تحقیق یک تکنیک جدید تشخیص خطا مبتنی بر تبدیل





موجک گسسته<sup>۹</sup> را در پارامترهای مختلف، یعنی شروع خطا و مقاومت خطا با انتخاب مناسب موجک ارائه می‌کند) نمی‌توانند عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی را تحت تاثیر قرار دهند. در این مقاله علاوه بر حل مشکلات موجود، الگوریتم پیشنهادی جدید بر مبنای امیدانس پایلوت با استفاده از داده‌های فازوری سنکرون خط انتقال پیشنهاد شده است. امیدانس پایلوت از ولتاژ سنکرون و فازورهای جریان توالی مولفه‌های مثبت، منفی و صفر از دو طرف پایانی خط بدست می‌آید، هنگامی که خط توسط شبکه های ارتباطی با سرعت بالا مجهز شده باشد، ویژگی متفاوت امیدانس پایلوت برای خطای داخلی و خطای خارجی کمیت تشخیص خطا پیشنهاد شده است. معیار حفاظت داده می‌شود تا خطای خط را تشخیص دهد. وقتی خطای داخلی رخ می‌دهد مقدار معیار حفاظت اولی کمتر از صفر و اندازه معیار حفاظتی دومی بسیار بیشتر از ۱ می‌باشد ولی برای خطای خارجی که معیار اول حفاظت برابر امیدانس مشخصه خط می‌باشد مقدار آن مثبت و اندازه معیار دوم حفاظت همیشه کمتر از ۱ بوده است. علاوه بر این برای سو عملکرد از عملیات نوسان توان و عملکرد فاز باز، اقدامات مسدودکننده‌ای بکار برده شده است. این الگوریتم با شبیه‌سازی‌های مختلف در سیستم IEEE ۳۹ باسه آزمایش شده است. قسمت نهفته در امیدانس‌های پایلوت جدید در دو طرف خط بترتیب تعریف می‌شود تا کمیت تشخیص خطا با مولفه‌های خطا از داده‌های فازوری سنکرون ایجاد کند. امیدانس پایلوت می‌تواند خطا را با حساسیت بالا تشخیص دهد و تحت تاثیر انواع خطا، مکان‌ها، مقاومت، منبع ضعیف، تجاوز بار و نوسان توان قرار نمی‌گیرد. در بخش دوم ویژگی و تعریف امیدانس پایلوت جدید شرح داده است. در بخش سوم کمیت تشخیص خطا و معیار حفاظت ارائه شده است. در ادامه و در بخش چهارم شبیه‌سازی موارد براساس اثربخشی الگوریتم ارائه داده شده است و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۲- روش پیشنهادی تشخیص خطا با استفاده از امیدانس پایلوت

### ۲-۱- امیدانس پایلوت

طبق شکل (۱) که مدل خط  $\pi$  از خطوط انتقال<sup>۱۰</sup> را نشان می‌دهد،  $a$  و  $b$  باس‌های خطوط هستند که به هر کدام از باس‌ها، توربین بادی با توان تولیدی  $۲/۵$  مگاوات وصل هستند.  $Z_a$  و  $Z_b$  امیدانس معادل کل پشت دو تا باس هستند.  $Z$  امیدانس مشخصه خط است.  $Z_c$  امیدانس معادل خازن خط است.  $\alpha$  نقطه‌ی وقوع خطا از باس خطوط است.  $\Delta \hat{U}_a$  و  $\Delta \hat{U}_b$  مولفه‌های خطای ولتاژ دو تا باس هستند  $\Delta \hat{I}_a$  و  $\Delta \hat{I}_b$  مولفه‌های جریان دو تا باس هستند.  $\Delta \hat{U}_f$  مولفه خطای ولتاژ در نقطه  $f$  است.  $R_f$  مقاومت خطا است. ابتدا برای مولفه خطای توالی مثبت طبق شکل (۱) ابتدا KVL می‌زنیم تا امیدانس معادل پشت باس  $a$  و  $b$  برای خطای داخلی و خارجی نسبت به نقطه‌ی  $\alpha$  بصورت  $Z_{Fa1}$  و  $Z_{Fb1}$  بدست آید، همین کار برای مولفه خطای توالی منفی و صفر نیز بدست می‌آید که که بصورت  $Z_{Fa2}$ ،  $Z_{Fb2}$ ،  $Z_{Fa0}$  و  $Z_{Fb0}$  تعریف می‌شود.  $\Delta \hat{U}_{a1}$ ،  $\Delta \hat{U}_{b1}$ ،  $\Delta \hat{I}_{a1}$  و  $\Delta \hat{I}_{b1}$  بترتیب مولفه‌های توالی مثبت ولتاژ و جریان دو تا باس هستند.  $Z_{c1}$  امیدانس معادل خازن توالی مثبت خط و  $Z_1$  امیدانس توالی مثبت خط است.

### ۲-۲- امیدانس پایلوت برای خطای داخلی

با توجه به شکل (۱-الف) برای خطای داخلی، ابتدا از باس  $a$  یک KVL زده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta \hat{U}_{a1} + \alpha Z \left\{ -\Delta \hat{I}_{a1} + \frac{\Delta \hat{U}_{a1}}{Z_b} \right\} = \Delta \hat{U}_{b1} + (1-\alpha)Z \left\{ -\Delta \hat{I}_{b1} + \frac{\Delta \hat{U}_{b1}}{Z_c} \right\} \quad (1)$$

اگر به معادله (۱) عبارت  $\frac{(1-\alpha)Z}{Z_c} \Delta \hat{U}_{a1}$  اضافه کنیم معادله (۲) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta \hat{U}_{a1} + \alpha Z \left\{ -\Delta \hat{I}_{a1} + \frac{\Delta \hat{U}_{a1}}{Z_c} \right\} + \frac{(1-\alpha)Z}{Z_c} \Delta \hat{U}_{a1} = \Delta \hat{U}_{b1} + (1-\alpha)Z \left\{ -\Delta \hat{I}_{b1} + \frac{\Delta \hat{U}_{b1}}{Z_c} \right\} + \frac{(1-\alpha)Z}{Z_c} \Delta \hat{U}_{a1} \quad (2)$$

که با جایجایی مقادیر ولتاژ به طرف چپ معادله بصورت زیر بدست می‌آید:



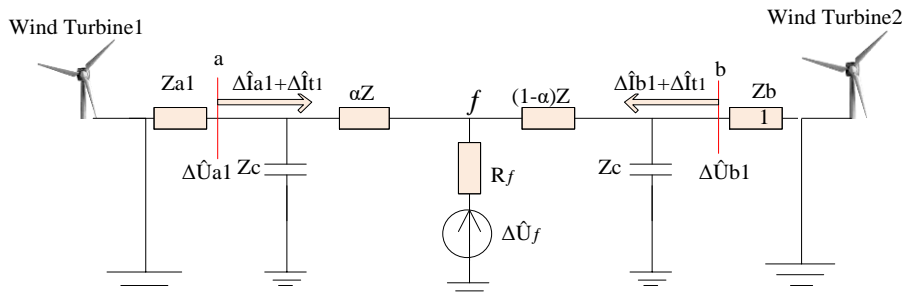
$$\Delta \hat{U}_{a1} - \Delta \hat{U}_{b1} + Z \Delta \hat{I}_{b1} + \frac{\Delta \hat{U}_{a1}}{Z_c} = Z \left[ \alpha (\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}) + \frac{(1-\alpha)}{Z_c} (\Delta \hat{U}_{a1} + \Delta \hat{U}_{b1}) \right] \quad (3)$$

معادله ی (۳) را تقسیم بر عبارت  $\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}$  می‌کنیم عبارت زیر بدست می‌آید:

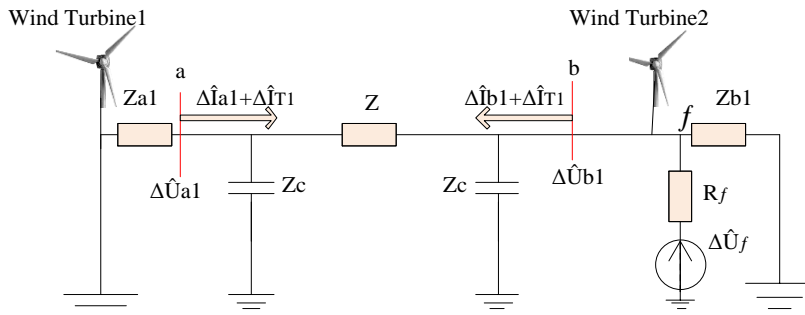
$$\frac{\Delta \hat{U}_{a1} - \Delta \hat{U}_{b1} + Z \Delta \hat{I}_{b1} + \frac{\Delta \hat{U}_{a1}}{Z_c} Z}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} = Z \left[ \alpha + \frac{(1-\alpha)}{Z_c} \left( \frac{\Delta \hat{U}_{a1} + \Delta \hat{U}_{b1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} \right) \right] \quad (4)$$

طرف چپ معادله (۴) امپدانس پایلوت باس a است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta \hat{U}_{a1} - \Delta \hat{U}_{b1} + Z \Delta \hat{I}_{b1} + \frac{Z}{Z_c} \Delta \hat{U}_{a1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} = Z \left[ \alpha + \frac{(1-\alpha)}{Z_c} \left( \frac{\Delta \hat{U}_{a1} + \Delta \hat{U}_{b1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} \right) \right] \quad (5)$$



(الف)



(ب)

شکل (۱): مدل  $\pi$  خط خطوط انتقال همراه با مولفه‌های خط، (الف) خطای داخلی ب) خطای خارجی

در سمت راست معادله (۵) مقدار  $\beta$  جایگزین  $\frac{1-\alpha}{Z_c} \left( \frac{\Delta \hat{U}_m + \Delta \hat{U}_n}{\Delta \hat{I}_m + \Delta \hat{I}_n} \right)$  تعریف می‌شود. برای خط انتقال کوتاه و متوسط مقدار

برابر ده‌ها اهم که بسیار کوچکتر از  $Z_c$  است. بنابراین مقدار  $\beta$  نزدیک به صفر است، ولی برای خط انتقال با ولتاژ

خیلی بالا بخصوص برای خط هایی به طول ۴۰۰ کیلومتر، مقدار  $Z_c$  ممکن است کمتر از ۱۰۰۰ اهم شود، و مقدار  $\beta$  را نمی‌توان نادیده گرفت. معیار خطای توالی مثبت  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_0$  بین ماکزیمم  $Z_{Fm}$  و  $Z_{Fa1}$  تعریف می‌شود. حال سمت چپ معادله (۵) امپدانس معادله باس a است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{Fa1} = \frac{\Delta \hat{U}_{a1} - \Delta \hat{U}_{b1} + Z \Delta \hat{I}_{b1} + \frac{Z}{Z_c} \Delta \hat{U}_{a1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} \quad (6)$$

با توجه به شکل (۱-الف) برای خطای داخلی برای باس b یک KVL نسبت به نقطه ی f زده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:





$$\Delta \hat{U}_{b1} - \Delta \hat{U}_{a1} + Z \Delta \hat{I}_{a1} + \frac{\Delta \hat{U}_{b1}}{Z_C} = Z \left[ (1-\alpha)(\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}) + \alpha \left( \frac{\Delta \hat{U}_{b1} - \Delta \hat{U}_{a1}}{Z_C} \right) \right] \quad (7)$$

مثل باس a دو طرف معادله را تقسیم بر عبارت  $\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}$  می کنیم داریم:

$$\frac{\Delta \hat{U}_{b1} - \Delta \hat{U}_{a1} + Z \Delta \hat{I}_{a1} + \frac{\Delta \hat{U}_{b1}}{Z_C}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} = Z \left[ (1-\alpha) + \frac{\alpha}{Z_C} \left( \frac{\Delta \hat{U}_{b1} + \Delta \hat{U}_{a1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} \right) \right] \quad (8)$$

حالا طرف چپ معادله (8) امیدانس معادل باس b تعریف می شود:

$$Z_{Fb1} = \frac{\Delta \hat{U}_{b1} - \Delta \hat{U}_{a1} + Z \Delta \hat{I}_{a1} + \frac{Z}{Z_C} \Delta \hat{U}_{b1}}{\Delta \hat{I}_{a1} + \Delta \hat{I}_{b1}} \quad (9)$$

روابط برای توالی مثبت ولتاژ و جریان بدست آمده است که برای توالی منفی و صفر نیز به این صورت می باشد.

### ۲-۳- امیدانس پایلوت برای خطای خارجی

با توجه به شکل (۱-ب) برای خطای خارجی جریان دوتا باس a و b بصورت زیر بدست می آید:

$$\Delta \hat{I}_{a1} = \frac{\Delta \hat{U}_{a1} - \Delta \hat{U}_{b1}}{Z} + \frac{\Delta \hat{U}_{a1}}{Z_C} \quad (10)$$

$$\Delta \hat{I}_{b1} = \frac{\Delta \hat{U}_{b1} - \Delta \hat{U}_{a1}}{Z} + \frac{\Delta \hat{U}_{b1}}{Z_C} \quad (11)$$

اگر معادله‌ی (۱۰) و (۱۱) را در معادله‌ی (۶) جاگذاری کنیم امیدانس معادل برای خطای خارجی باس a بدست می آید:

$$Z = Z_{Fa1} \quad (12)$$

همچنین اگر معادله‌ی (۱۰) و (۱۱) را در معادله‌ی (۹) جاگذاری کنیم امیدانس معادل برای خطای خارجی باس b بدست می آید:

$$Z = Z_{Fb1} \quad (13)$$

روابط برای توالی مثبت ولتاژ و جریان بدست آمده است که برای توالی منفی و صفر برای باس a و b برای خطای داخلی و خارجی نیز بترتیب به این صورت می باشد:

$$Z_{Fa2} = \frac{\Delta \hat{U}_{a2} - \Delta \hat{U}_{b2} + Z \Delta \hat{I}_{b2} + \frac{Z}{Z_C} \Delta \hat{U}_{a2}}{\Delta \hat{I}_{a2} + \Delta \hat{I}_{b2}} \quad (14)$$

$$Z_{Fa0} = \frac{\Delta \hat{U}_{a0} - \Delta \hat{U}_{b0} + Z \Delta \hat{I}_{b0} + \frac{Z}{Z_C} \Delta \hat{U}_{a0}}{\Delta \hat{I}_{a0} + \Delta \hat{I}_{b0}} \quad (15)$$

$$Z_{Fb2} = \frac{\Delta \hat{U}_{b2} - \Delta \hat{U}_{a2} + Z \Delta \hat{I}_{a2} + \frac{Z}{Z_C} \Delta \hat{U}_{b2}}{\Delta \hat{I}_{a2} + \Delta \hat{I}_{b2}} \quad (16)$$

$$Z_{Fb0} = \frac{\Delta \hat{U}_{b0} - \Delta \hat{U}_{a0} + Z \Delta \hat{I}_{a0} + \frac{Z}{Z_C} \Delta \hat{U}_{b0}}{\Delta \hat{I}_{a0} + \Delta \hat{I}_{b0}} \quad (17)$$

$$Z = Z_{Fa2} \quad (18)$$

$$Z = Z_{Fa0} \quad (19)$$

$$Z = Z_{Fb2} \quad (20)$$



$$Z = Z_{Fb0} \quad (21)$$

### ۳- معیار پیشنهادی حفاظت براساس امپدانس پایلوت

با استفاده از روابط بالا که بدست آوردیم با استفاده از توالی مثبت، منفی و صفر فازور ولتاژ و جریان قبل و بعد خطا که برای باس a و باس b بترتیب بصورت  $Z_{Fb}$  و  $Z_{Fa}$  تعریف کردیم معیار پیشنهادی ما برای خطای داخلی و خارجی بصورت F تعریف می‌شود که اگر دو برابر باس b را منهای باس a شود مقدار بدست آمده بصورت مختلط خواهد بود که با استفاده از علامت موهومی مقدار بدست آمده خطای داخلی از خطای خارجی مشخص می‌گردد. چون مقدار امپدانس معادل برای خطای خارجی برای دو تا باس مورد نظر برابر با امپدانس مشخصه خط است با استفاده از معیار پیشنهادی برای خطای خارجی علامت مقدار موهومی برای خطای خارجی مثبت است و برای خطای داخلی این علامت باید همیشه منفی باشد که شبیه‌سازی بدست آمده در ادامه نیز این معیار را برای ما اثبات می‌کند برای همین ما یک معیار دوم تعریف می‌کنیم که با استفاده از مقادیر پریونیت فازور ولتاژ و جریان اگر از معیار اولی اندازه آن گرفته شود این مقدار برای خطای داخلی خیلی بیشتر از ۱ خواهد بود ولی برای خارجی که برابر با امپدانس خط است که ثابت و کمتر از ۱ است.

$$F_1 = (2Z_{b1} - Z_{a1}) \quad (22)$$

$$F_2 = (2Z_{b2} - Z_{a2}) \quad (23)$$

$$F_0 = (2Z_{b0} - Z_{a0}) \quad (24)$$

#### ۱-۳ طرح اول پیشنهادی حفاظت برای خطای داخلی

مولفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر ولتاژ و جریان معیار حفاظت برای تشخیص خطای داخلی از خطای خارجی را برای ما مشخص می‌کند. ابتدا برای مولفه‌ی توالی مثبت مقدار  $Z_{Fb1}$  و  $Z_{Fa1}$  بدست می‌آید سپس مقدار  $F_1$  مشخص می‌شود و همین کار نیز برای مولفه‌ی توالی منفی و صفر انجام می‌شود و مقادیر  $F_2$  و  $F_0$  نیز بدست می‌آید همانطور که در بالا بحث کردیم اگر دو برابر باس b را از باس a کم کنیم با توجه به مقدار مختلط بدست آمده علامت موهومی مقدار بدست آمده برابر با مینیمم مقدار توالی مثبت، منفی و صفر است که با توجه به نتایج بدست آمده برای خطاهای تک فاز به زمین، دوفاز به هم و سه فاز به هم برابر توالی مثبت طبق (۲۵) و برای خطاهای دوفاز به زمین برابر توالی منفی طبق (۲۶) همیشه منفی خواهد بود. بدین صورت اگر مقدار مینیمم سه تا توالی مثبت، منفی و صفر ( $F_0$  و  $F_2$ ,  $F_1$ ) بدست آید علامت مقدار مختلط بدست آمده برای خطای داخلی منفی خواهد بود.

$$F_{first} = \text{img} \{ \min(F_1, F_2, F_0) \} = \text{img}(F) < 0 \quad (25)$$

for(AG, AB, ABC)

$$F_{first} = \text{img} \{ \max(F_1, F_2, F_0) \} = \text{img}(F) < 0 \quad (26)$$

for(ABG)

#### ۲-۳ طرح دوم پیشنهادی حفاظت برای خطای داخلی

طبق گفته‌های بالا و روابطی که اثبات کردیم ابتدا با استفاده از مولفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر مقادیر  $F_1$ ,  $F_2$  و  $F_0$  بدست می‌آوریم سپس از مینیمم مقدار این سه تا اندازه آن را بدست می‌آوریم که برای خطای داخلی طبق (۲۷) و (۲۸) خیلی بیشتر از ۱ می‌باشد.

$$F_{second} = \text{abs} \{ \min(F_1, F_2, F_0) \} = \text{abs}(F) \gg 1 \quad (27)$$

for(AG, AB, ABC)

$$F_{second} = \text{abs} \{ \max(F_1, F_2, F_0) \} = \text{abs}(F) \gg 1 \quad (28)$$

for(ABG)





### ۳-۳- طرح اول پیشنهادی حفاظت برای خطای خارجی

طبق روابط (۱۲) و (۱۳) که امپدانس معادل مولفه توالی مثبت دو تا باس برابر با امپدانس مشخصه خط می باشد طبق معیار حفاظت پیشنهادی اگر دو برابر باس  $b$  را از باس  $a$  کم کنیم مقدار معیار پیشنهادی طبق (۲۹) برابر با مقدار  $Z$  می شود و معیار پیشنهادی ما طبق (۲۹) بدست می آید که علامت موهومی مقدار بدست آمده همیشه مثبت و ثابت است.

$$F_{first} = F_1 = F_2 = F_0 = (2Z_b - Z_a) = Z \quad (29)$$

$$F_{first} = \text{img} \{ \min(F_1, F_2, F_0) \} = \text{img} \{ Z \} > 0 \quad (30)$$

### ۳-۴- طرح دوم پیشنهادی حفاظت برای خطای خارجی

برای اثبات معیار دوم برای خطای خارجی مثل خطای داخلی ابتدا مقدار  $F$  طبق (۲۷) را بدست می آوریم سپس اگر اندازه آن را بدست آوریم مقدار آن که برابر با امپدانس خط می شود که ثابت و کمتر از ۱ است (۲۸).

$$F_{second} = \text{abs} \{ \min(F_1, F_2, F_0) \} = \text{abs} \{ Z \} < 1 \quad (31)$$

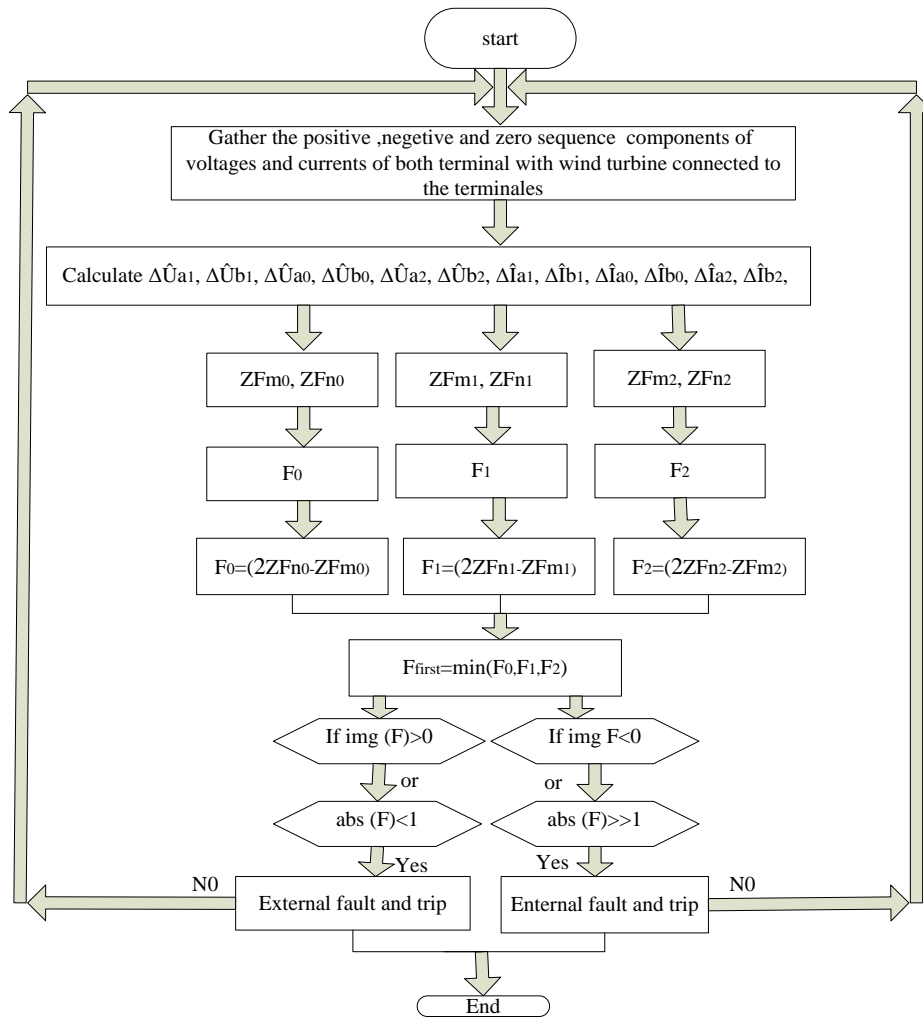
### ۳-۵- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

فلوچارت مراحل الگوریتم پیشنهادی طبق شکل (۳) بصورت زیر می باشد:

- ابتدا مولفه توالی مثبت، منفی و صفر فازور ولتاژ و جریان دو تا باس را بدست می آوریم.
- امپدانس معادل دو تا باس برای مولفه توالی مثبت، منفی و صفر ( $Z_{a1}, Z_{b1}, Z_{a2}, Z_{b2}, Z_{a0}, Z_{b0}$ ) محاسبه می کنیم.
- مقادیر ( $F_1, F_2, F_0$ ) طبق گفته های بالا بدست می آید.
- مقدار مینیمم ( $F_1, F_2, F_0$ ) را نیز بدست می آوریم.
- اگر علامت مقدار مختلط بدست آمده منفی باشد و اندازه  $F$  خیلی بیشتر از ۱ باشد خطای داخلی رخ داده است.







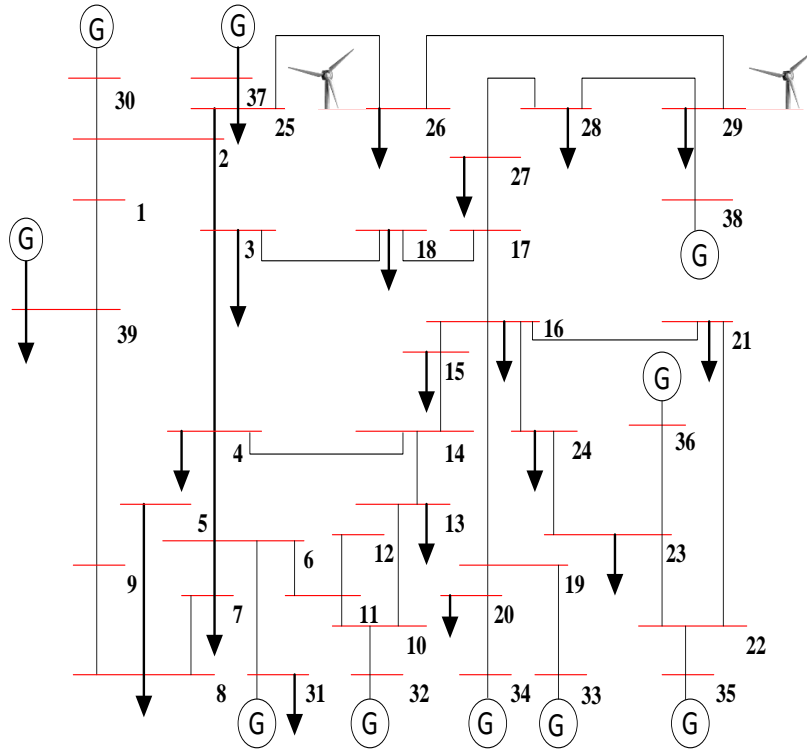
شکل (۲): فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی ابتدا در یک سیستم ۳۹ باسه IEEE در خط ۲۹-۲۶ در نرم‌افزار DigSILENT آزمایش شده است.

#### ۴-۱- نتایج شبیه در سیستم ۳۹ باسه IEEE

آزمایش‌ها رو سیستم ۳۹ باسه IEEE طبق شکل (۳) در خط ۲۹-۲۶ تست شده است که ولتاژنامی خط برابر با ۳۴۵ کیلوولت و طول خط برابر ۲۴۷ کیلومتر است که طبق شکل (۱) مدل  $\pi$  آنرا در نظر گرفتیم.



شکل (۳): سیستم ۳۹ باسه IEEE

#### ۴-۲- تاثیر مقاومت خطا و مکان خطا

طبق شکل (۳) که انواع خطاها، مکان‌های مختلف (AG، AB و ABC) با مقاومت‌های مختلف (۰، ۳۰۰ و ۹۰۰) خطا در خط ۲۹-۲۶ در یک سیستم ۳۹ باسه IEEE آزمایش شده است که نتایج آن در جدول (۱) و (۲) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود که طبق الگوریتم پیشنهادی اول هنگامی که خطای داخلی رخ می‌دهد طرف‌نظر از هرگونه خطا و مقاومت خطا، معیار حفاظت اولی درست جواب داده است که علامت مقدار مختلط بدست آمده برای خطای داخلی همیشه منفی است و همچنین معیار دوم حفاظت برای خطای داخلی باید خیلی بیشتر از یک می‌شد که در این مورد نیز به درستی الگوریتم پیشنهادی تشخیص داده است که برای خطاهای تک‌فاز به زمین، دوفاز و سه فاز به هم طبق جدول (۱) و برای خطاهای دوفاز به زمین طبق جدول (۲) بدست آمده است. همچنین، برای خطای خارجی نیز باید علامت موهومی مقدار مختلط بدست آمده باید مثبت باشد، طبق اثبات‌هایی که در بالا انجام دادیم برای خطای خارجی علامت موهومی این مقدار همیشه مثبت است. همچنین برای معیار دومی که این مقدار بدست آمده باید همیشه کمتر از ۱ باشد چون برای خطای داخلی معیار حفاظت برابر با امیدانس مشخصه خط است لذا این مقدار ثابت و همیشه کمتر از ۱ است (جدول ۱ و ۲).

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطاها با مکان‌ها و مقاومت‌های مختلف خطا

نوع خطا	موقعیت خطا	مقاومت خطا	$F_1$	$F_2$	$F_0$	$F$
AG	۵	۰	$۸/۱ \times ۱۰^{-۳}$	$-۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۷/۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۱ \times ۱۰^{-۳}$
			$۵/۱ \times ۱۰^{-۴} i$	$۳/۲ \times ۱۰^{-۴} i$	$۲/۲ \times ۱۰^{-۴} i$	$۵/۱ \times ۱۰^{-۴} i$
	۳۰۰	۰	$-۶/۷ \times ۱۰^{-۴}$	$-۹/۱ \times ۱۰^{-۵} +$	$-۱/۱ \times ۱۰^{-۵} +$	$-۶/۷ \times ۱۰^{-۴}$
			$۱/۳ \times ۱۰^{-۵} i$	$۶/۳ \times ۱۰^{-۵} i$	$۸/۴ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱/۳ \times ۱۰^{-۵} i$
			$-۷/۷ \times ۱۰^{-۶}$	$-۴/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$-۷/۹ \times ۱۰^{-۵}$	$-۷/۷ \times ۱۰^{-۶}$
			$۵/۵ \times ۱۰^{-۴} i$	$۳/۲ \times ۱۰^{-۴} i$	$۲/۱ \times ۱۰^{-۴} i$	$۵/۵ \times ۱۰^{-۴} i$
۵۰	۰	$۸/۵ \times ۱۰^{-۴}$	$-۹/۶ \times ۱۰^{-۳} +$	$-۱/۲ \times ۱۰^{-۶} +$	$۸/۵ \times ۱۰^{-۴}$	
		$۱/۵ \times ۱۰^{-۵} i$	$۵/۸ \times ۱۰^{-۵} i$	$۴/۴ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱/۵ \times ۱۰^{-۵} i$	
AB	۳۰۰	۰	$-۵/۴ \times ۱۰^{-۴}$	$-۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$	--	$-۵/۴ \times ۱۰^{-۴}$
			$۴/۵ \times ۱۰^{-۴} i$	$۵/۱ \times ۱۰^{-۵} i$	--	$۴/۵ \times ۱۰^{-۴} i$
	۹۰۰	۰	$-۸/۹ \times ۱۰^{-۴}$	$-۶/۱ \times ۱۰^{-۵}$	--	$-۸/۹ \times ۱۰^{-۴}$
			$۱/۳ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱/۱ \times ۱۰^{-۶} i$	--	$۱/۳ \times ۱۰^{-۵} i$
			$-۲/۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۹/۹ \times ۱۰^{-۲} +$	--	$۹/۹ \times ۱۰^{-۲} +$
			$۱/۲ \times ۱۰^{-۴} i$	$۵/۸ \times ۱۰^{-۳} i$	--	$۵/۸ \times ۱۰^{-۳} i$
۵۰	۰	$-۱/۱ \times ۱۰^{-۵}$	$-۵/۶ \times ۱۰^{-۵}$	--	$-۱/۱ \times ۱۰^{-۵}$	
		$۱/۴ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱/۱ \times ۱۰^{-۶} i$	--	$۱/۴ \times ۱۰^{-۵} i$	
۹۰	۰	$-۵/۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۹ \times ۱۰^{-۴} +$	--	$۳/۹ \times ۱۰^{-۴} +$	
		$۶/۶ \times ۱۰^{-۳} i$	$۷/۹ \times ۱۰^{-۳} i$	--	$۷/۹ \times ۱۰^{-۳} i$	
ABC	۵	۰	$-۴/۲ \times ۱۰^{-۳}$	--	--	$-۴/۲ \times ۱۰^{-۳}$
			$۵/۴ \times ۱۰^{-۳} i$	--	--	$۵/۴ \times ۱۰^{-۳} i$
	۹۰۰	۰	$-۹/۳ \times ۱۰^{-۴}$	--	--	$-۹/۳ \times ۱۰^{-۴}$
			$۵/۴ \times ۱۰^{-۳} i$	--	--	$۵/۴ \times ۱۰^{-۳} i$
			$-۳/۲ \times ۱۰^{-۴}$	--	--	$-۳/۲ \times ۱۰^{-۴}$
			$۴/۸ \times ۱۰^{-۳} i$	--	--	$۴/۸ \times ۱۰^{-۳} i$
۵۰	۰	$-۲/۲ \times ۱۰^{-۴}$	--	--	$-۲/۲ \times ۱۰^{-۴}$	
		$۳/۲ \times ۱۰^{-۵} i$	--	--	$۳/۲ \times ۱۰^{-۵} i$	
۹۰	۰	$-۵/۹ \times ۱۰^{-۴}$	--	--	$-۵/۹ \times ۱۰^{-۴}$	
		$۴/۹ \times ۱۰^{-۲} i$	--	--	$۴/۹ \times ۱۰^{-۲} i$	

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای خطای (ABG)، مکان خطا و مقاومت‌های مختلف خطا

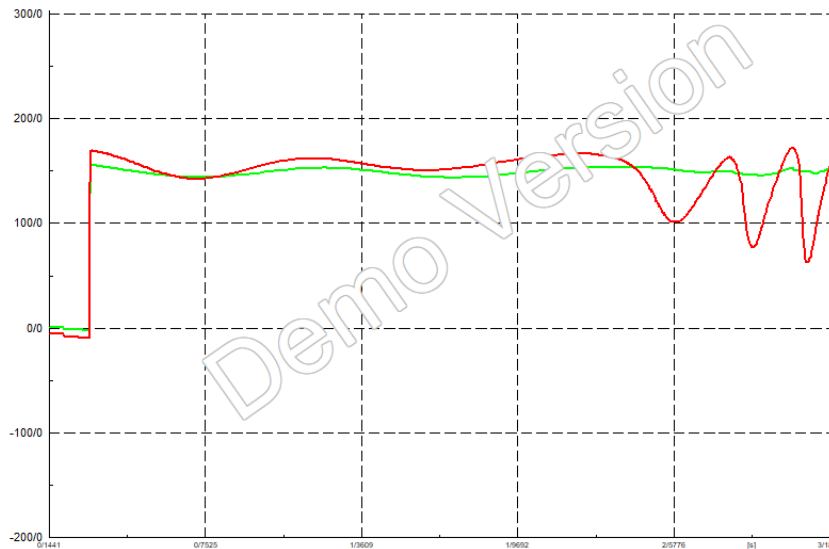
نوع خطا	موقعیت خطا	مقاومت خطا	$F_1$	$F_2$	$F_0$	$F$
ABG	۹۰۰	۰	$۷/۳ \times ۱۰^{-۴}$	$-۶/۳ \times ۱۰^{-۶}$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$	$-۶/۳ \times ۱۰^{-۶}$
			$۱/۸ \times ۱۰^{-۵} i$	$۲/۹ \times ۱۰^{-۶} i$	$۸/۶ \times ۱۰^{-۵} i$	$۲/۹ \times ۱۰^{-۶} i$
	۵۰	۰	$۴/۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۹ \times ۱۰^{-۴} +$	$۲/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۶ \times ۱۰^{-۵}$
			$۱/۳ \times ۱۰^{-۴} i$	$۶ \times ۱۰^{-۳} i$	$۸/۶ \times ۱۰^{-۴} i$	$۸/۶ \times ۱۰^{-۴} i$
			$-۱/۵ \times ۱۰^{-۵} +$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$	$-۱/۵ \times ۱۰^{-۶}$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$
			$۳ \times ۱۰^{-۴} i$	$۱۱/۱ \times ۱۰^{-۶} i$	$۹/۳ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱۱/۱ \times ۱۰^{-۶} i$
۹۰	۳۰۰	$-۸/۷ \times ۱۰^{-۴} +$	$-۴/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$-۷/۵ \times ۱۰^{-۵}$	$-۴/۶ \times ۱۰^{-۵}$	
		$۲/۲ \times ۱۰^{-۴} i$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶} i$	$۹/۲ \times ۱۰^{-۵} i$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶} i$	
۹۰۰	۰	$-۸/۸ \times ۱۰^{-۴} +$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۶}$	
		$۸/۳ \times ۱۰^{-۴} i$	$۹/۸ \times ۱۰^{-۵} i$	$۸/۶ \times ۱۰^{-۵} i$	$۹/۸ \times ۱۰^{-۵} i$	





#### ۴-۳- اثرات تجاوز بار

برای اینکه رله دیستانس<sup>۱۱</sup> بتواند خطاهای داخلی را از تجاوز بار تشخیص بدهد توان اکتیو و راکتیو در باس ۲۶ در  $0.2$  ثانیه دو برابر می‌کنیم و جریان طبق شکل (۴) افزایش یافته است سپس، انواع خطا را در  $0.3$  ثانیه ایجاد می‌کنیم همان‌طور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۳) و شکل (۵) الگوریتم پیشنهادی اول برای خطاهای داخلی علامت موهومی همیشه منفی و برای خطاهای خارجی که مثبت بوده و الگوریتم پیشنهادی دوم نیز به درستی خطای داخلی را از تجاوز، بار صرف‌نظر از مقاومت خطا و مکان خطا تشخیص داده است، که برای خطاهای داخلی طبق جدول (۳)، اگر اندازه  $F$  گرفته شود که مقدار آن بسیار بزرگ‌تر از ۱ طبق (۲۷) و (۲۸) برای خطای خارجی که برابر امیدانس مشخصه خط است مقدار آن کمتر از ۱ است.



شکل (۴): شکل موج جریان در انتهای خط ۲۹-۲۶ هنگام تجاوز بار

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطا و مقاومت خطا با مکان‌های مختلف

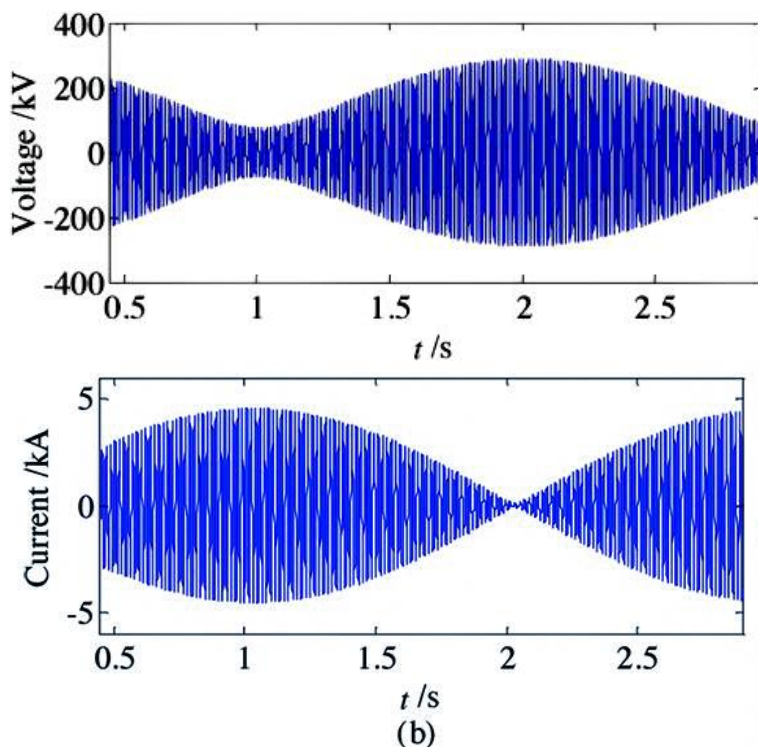
نوع خطا	موقعیت خطا	مقاومت خطا	$F_1$	$F_2$	$F_0$	$F$
AG	۵	.	$-9/2 \times 10^6$	$7/5 \times 10^6$	$4/1 \times 10^6$	$4/1 \times 10^6$
	۵۰	.	$7/9 \times 10^6 i$	$5/1 \times 10^7 i$	$1/8 \times 10^5 i$	$1/8 \times 10^5 i$
ABG	۵۰	.	$6/3 \times 10^3$	$6/1 \times 10^7$	$8/4 \times 10^7$	$6/3 \times 10^3$
	۹۰	.	$3/3 \times 10^5 i$	$1/8 \times 10^7 i$	$1/2 \times 10^8 i$	$3/3 \times 10^5 i$
ABC	۵	.	$1/5 \times 10^4$	$1/2 \times 10^5$	$-1/1 \times 10^6$	$-1/1 \times 10^6$
	۵۰	.	$2/6 \times 10^4 i$	$1/9 \times 10^5 i$	$1/2 \times 10^6 i$	$1/2 \times 10^6 i$
ABC	۵	.	$-2/2 \times 10^5$	$-6/8 \times 10^5$	$-1/1 \times 10^6$	$-1/1 \times 10^6$
	۵۰	.	$6/5 \times 10^5 i$	$2/1 \times 10^5 i$	$3/2 \times 10^6 i$	$3/2 \times 10^6 i$
	۵۰	.	$-1/1 \times 10^6$	--	--	$-1/1 \times 10^6$
ABC	۵	.	$3/1 \times 10^7 i$	--	--	$1/3 \times 10^7 i$
	۵۰	.	$5 \times 10^6 +$	--	--	$5 \times 10^6 +$
ABC	۵	.	$7/1 \times 10^6 i$	--	--	$7/1 \times 10^6 i$

#### ۴-۴- عملکرد الگوریتم پیشنهادی در طول نوسان توان

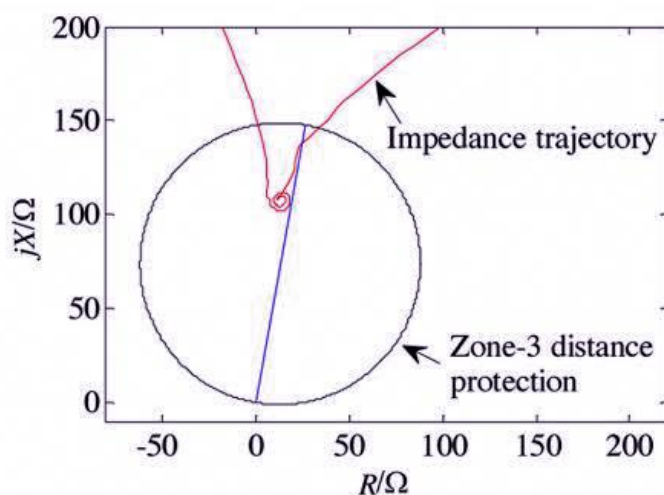
عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حین نوسان توان<sup>۱۲</sup> در بخش A آزمایش شده است. خطای سه فاز در وسط خط L28-29 در  $0.2$  ثانیه و در  $0.3$  ثانیه بوسیله بریکر در انتهای خط رفع شده است. پس از رفع خطا نوسان توان در خط L26-29 مشاهده می‌شود. شکل موج



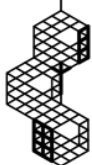
ولتاژ و جریان در L26-29 در حین نوسان توان در شکل (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است. در حین نوسان توان مسیر امپدانس در باس ۲۹ در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مسیر امپدانس وارد محدوده حفاظتی ناحیه می‌شود، که منجر به کنترل از راه دور ناهجاری ناحیه ۳ می‌شود. طبق جدول (۴) علامت موهومی معیار حفاظتی برای خطاهای داخلی منفی و اندازه آن بزرگتر از ۱ است.



شکل (۵): الف: شکل موج جریان و ولتاژ از خط L26-29 در حین نوسان توان، ب: شکل موج ولتاژ شکل موج جریان



شکل (۶): مسیر امپدانس رله در باس ۲۶ در حین نوسانات بار





جدول (۴): نتایج شبیه سازی برای انواع مختلف خطا و مقاومت خطا حین نوسان توان

نوع خطا	موقعیت خطا	مقاومت خطا	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>0</sub>	F	
AG	۵	۰	$-۶/۷ \times ۱۰^۴ - ۱/۳ \times ۱۰^۵ i$	$۹/۱ \times ۱۰^۵ + ۶/۳ \times ۱۰^۵ i$	$-۱/۱ \times ۱۰^۶ + ۴/۸ \times ۱۰^۵ i$	$-۶/۷ \times ۱۰^۴ - ۱/۳ \times ۱۰^۵ i$	
			$۷/۷ \times ۱۰^۲ - ۵/۵ \times ۱۰^۴ i$	$-۴/۶ \times ۱۰^۵ - ۳/۲ \times ۱۰^۴ i$	$۷/۹ \times ۱۰^۵ - ۲/۱ \times ۱۰^۴ i$	$۷/۷ \times ۱۰^۲ - ۵/۵ \times ۱۰^۴ i$	
			۳۰۰	$-۶/۹ \times ۱۰^۴ - ۶/۸ \times ۱۰^۵ - ۶/۷ \times ۱۰^۴ i$	$-۶/۸ \times ۱۰^۵ - ۶/۵ \times ۱۰^۵ i$	$۷/۶ \times ۱۰^۵ - ۱/۳ \times ۱۰^۶ i$	$۷/۶ \times ۱۰^۵ - ۱/۳ \times ۱۰^۶ i$
ABG	۵۰	۳۰۰	$۴/۸ \times ۱۰^۴ - ۱/۳ \times ۱۰^۴ i$	$۹/۱ \times ۱۰^۴ + ۶/۱ \times ۱۰^۲ i$	$۲/۶ \times ۱۰^۵ - ۸/۶ \times ۱۰^۴ i$	$۲/۶ \times ۱۰^۵ - ۸/۶ \times ۱۰^۴ i$	
			۹۰۰	$-۵/۴ \times ۱۰^۴ - ۱/۶ \times ۱۰^۴ i$	$۴/۹ \times ۱۰^۴ + ۳/۶ \times ۱۰^۴ i$	--	$-۵/۴ \times ۱۰^۴ - ۱/۶ \times ۱۰^۴ i$
			۹۰	$-۸/۷ \times ۱۰^۴ - ۲/۲ \times ۱۰^۴ i$	--	--	$-۸/۷ \times ۱۰^۴ - ۲/۲ \times ۱۰^۴ i$
ABC	۵۰	۳۰۰					

## ۵- نتیجه گیری

حفاظت خط ممکن است دچار سوء عملکرد به دلیل خطای مقاومت زیاد در خط انتقال بلند شود. امپدانس پایلوت جدید بر پایه حفاظت است که می تواند خطای خط انتقال را تشخیص بدهد در این مقاله آمده است. جریان و ولتاژهای همزمان در هر دو انتهای خط برای تعریف امپدانس پایلوت جدید استفاده می شود. ملاک کمیت خطا بر اساس امپدانس پایلوت می تواند خطای خط را شناسایی کند. روش حفاظت پایلوت برخلاف سایر روش های بکار برده شده تنها با استفاده از فازور ولتاژ و جریان دو تاباس و با در نظر گرفتن تشخیص تجاوز بار از خطاهای داخلی که از فاجعه خاموشی (۲۰۰۳ آمریکا و کانادا) جلوگیری شود، آزمایش ها روی سیستم ۳۹ باسه IEEE باس انجام می شود. حفاظت پایلوت صرف نظر از انواع خطا، موقعیت خطا، مقاومت خطا، طول خطوط و قدرت منبع است. طرح حفاظت می تواند خطای داخلی را از تجاوز بار و داده های فازوری غیرسنکرون تشخیص دهد و دارای یک عملکرد قابل اطمینان در طول نوسانات از طریق مسدود کردن بعضی اقدامات انجام گیرد. محدوده ناهنجاری در خط نداریم و علاوه بر این، نتایج تجربی نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی عملکرد خوبی برای تشخیص خطای داخلی از خطای خارجی دارد.

## مراجع

- [1] S. Horowitz and A. Phadke, "Third zone revisited," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 23-29, 2005. doi: 10.1109/TPWRD.2005.860244.
- [2] V. Rampurkar, P. Pentayya, H. A. Mangalvedekar, and F. Kazi, "Cascading failure analysis for Indian power grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1951-1960, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2530679.
- [3] R. Yao, S. Huang, K. Sun, F. Liu, X. Zhang, and S. Mei, "A multi-timescale quasi-dynamic model for simulation of cascading outages," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3189-32, 2015. doi: 10.1109/TPWRS.2015.2466116.
- [4] A. G. Phadke and B. Kasztenny, "Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 89-95, 2008. doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002665.
- [5] J. Zare, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "Synchrophasor-based wide-area backup protection scheme with data requirement analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1410-1419, 2014. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2377202.



- [6] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp, and A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 1, no. 1, pp. 20-27, 2010. doi: 10.1109/TSG.2010.2044815.
- [7] P. K. Nayak, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "Wide-area measurement-based backup protection for power network with series compensation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1970-1977, 2014. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2294183.
- [8] M. Chen, H. Wang, S. Shen, and B. He, "Research on a distance relay-based wide-area backup protection algorithm for transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 97-105, 2016. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2599198.
- [9] P. Kundu and A. K. Pradhan, "Online identification of protection element failure using wide area measurements," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 2, pp. 115-123, 2015. doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0276.
- [10] M. Eissa, M. E. Masoud, and M. M. M. Elanwar, "A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 270-278, 2009. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2035394.
- [11] Z. He, Z. Zhang, W. Chen, O. P. Malik, and X. Yin, "Wide-area backup protection algorithm based on fault component voltage distribution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2752-2760, 2011. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2165971.
- [12] S. K. Mohanty, P. K. Nayak, P. K. Bera, and H. H. Alhelou, "An enhanced protective relaying scheme for TCSC compensated line connecting DFIG-Based wind farm," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023. doi: 10.1109/TII.2023.3306575.
- [13] Z. Ali *et al.*, "Fault management in DC microgrids: A review of challenges, countermeasures, and future research trends," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 128032-128034, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112383.
- [14] J. Ma, C. Liu, and J. S. Thorp, "A wide-area backup protection algorithm based on distance protection fitting factor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2196-2205, 2015. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2504128.
- [15] Z. Li, X. Yin, Z. Zhang, and Z. He, "Wide-area protection fault identification algorithm based on multi-information fusion," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1348-1355, 2013. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2247638.
- [16] X. Tong, X. Wang, and K. M. Hopkinson, "The modeling and verification of peer-to-peer negotiating multiagent colored petri nets for wide-area backup protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 61-72, 2008. doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005661.
- [17] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand, and F. Aminifar, "Transmission system wide-area back-up protection using current phasor measurements," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 92, pp. 93-103, 2017. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.04.014.
- [18] Z. Yining and S. Jiale, "Phaselet-based current differential protection scheme based on transient capacitive current compensation," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 2, no. 4, pp. 469-477, 2008. doi: 10.1049/iet-gtd:20070494.
- [19] R. Kumar, S. Anand, and S. Parida, "A protection approach of AC transmission lines utilizing positive-sequence fault components," *Electric Power Systems Research*, vol. 233, p. 110-490, 2024. doi: 10.1016/j.epsr.2024.110490.
- [20] Y. Serizawa *et al.*, "Wide-area current differential backup protection employing broadband communications and time transfer systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1046-1052, 1998. doi: 10.1109/61.714445.
- [21] J. Suonan, X. Deng, and K. Liu, "Transmission line pilot protection principle based on integrated impedance," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 10, pp. 1003-1010, 2011. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0224.
- [22] S. He, J. Suonan, and Z. Bo, "Integrated impedance-based pilot protection scheme for the TCSC-compensated EHV/UHV transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 835-844, 2013. doi: 10.1109/TPWRD.2012.2236849.
- [23] M. K. Jena, S. Samantaray, and B. K. Panigrahi, "A new wide-area backup protection scheme for series-compensated transmission system," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1877-1887, 2015. doi: 10.1109/JSYST.2015.2467218.





- [24] J. Xia, S. Jiale, X. Deng, L. Wang, S. He, and K. Liu, "Enhanced transmission line pilot impedance and pilot protection," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 12, pp. 1240-1249, 2011. doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0628.
- [25] T. G. Bolandi, H. Seyedi, S. M. Hashemi, and P. S. Nezhad, "Impedance-differential protection: A new approach to transmission-line pilot protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2510-2518, 2015. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2387689.
- [26] S. Gangolu, P. Raja, M. Selvan, and V. K. Murali, "Effective algorithm for fault discrimination and estimation of fault location in transmission lines," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 13, pp. 2789-2798, 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5815.
- [27] G. Manassero and R. R. Tiferes, "Dynamic time warping based pilot protection algorithm for ac and hvdc transmission lines," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56846-56857, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3281500.
- [28] T. Spielböck and A. Belán, "Design of a one-sided, impedance-based transmission line fault locator using line topology and source impedances," *Electric Power Systems Research*, vol. 161, pp. 123-138, 2018. doi: 10.1016/j.epsr.2018.03.013.
- [29] K. Chen, J. Hu, and J. He, "Detection and classification of transmission line faults based on unsupervised feature learning and convolutional sparse autoencoder," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1748-1758, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2598881.
- [30] M. Khoshbouy, A. Yazdaninejadi, and T. G. Bolandi, "Transmission line adaptive protection scheme: A new fault detection approach based on pilot superimposed impedance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107826, 2022. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107826.
- [31] N. Ahmed, A. A. Hashmani, S. Khokhar, M. A. Tunio, and M. Faheem, "Fault detection through discrete wavelet transform in overhead power transmission lines ", *Energy Science & Engineering*, vol. 11, no. 11, pp. 4181-4197, 2023. doi: 10.1002/ese3.1573.

## زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Wide area measurement system
  - <sup>2</sup> Wide area back protection
  - <sup>3</sup> Distributed generation
  - <sup>4</sup> Thyristor controlled series capacitor
  - <sup>5</sup> Transient monitoring indexed
  - <sup>6</sup> Transormer current
  - <sup>7</sup> Fast fourier transform with fuzzy logic
  - <sup>8</sup> Load encroachment
  - <sup>9</sup> Discrete wavelet transform
  - <sup>10</sup> Transmission lines
  - <sup>11</sup> Distance reley
  - <sup>12</sup> Power swing

