استفاده از تبدیل کلارک به‌منظور تشخیص انواع نوسان توان و خطاهای همزمان با آن

بهروز طاهری[1] ، کارشناس ارشد، سید امیر حسینی[2]، استادیار ، فرزاد رضوی[1] ، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین- قزوین- ایران
behrooztaheri1372@gmail.com-farzad.razavi@qiau.ac.ir
۲- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان- اصفهان- ایران
hosseini.amir@gut.ac.ir

چکیده: **رله‌های دیستانس به‌طور گسترده برای حفاظت از خطوط انتقال انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. گاهی ممکن است در این خطوط در اثر وقوع نوسان توان، امپدانس محاسبه شده در رله دیستانس وارد زون‌های عملکردی آن شود و منجر به قطع بی-مورد خطوط شود. قطع بی‌مورد خطوط می‌تواند باعث بروز خاموشی‌های سراسری در شبکه‌های قدرت شود. بر این اساس در این مقاله روشی بر مبنای تبدیل کلارک برای تشخیص نوسان توان و تمایز آن از خطاهای هم‌زمان ارائه شده است. روش ارائه شده بر اساس محاسبه میانگین سیگنال‌های جریان شبکه در خروجی تبدیل کلارک عمل می‌کند. این روش مستقل از پارامترهای شبکه است و قابلیت تشخیص انواع نوسانات از جمله نوسان توان پایدار و ناپایدار و انواع خطاهای هم‌زمان را دارا می‌باشد. برای ارزیابی روش ارائه شده ابتدا حالت‌های مختلف نوسان توان و خطاهای هم‌زمان در نرم‌افزار DIgSILENT شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از داده‌های ماتریسی به‌دست آمده از سیگنال جریان، الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم‌افزار Matlab و با استفاده از تبدیل کلارک پیاده‌سازی شده است. علاوه بر ارزیابی نرم‌افزاری، روش پیشنهادی با استفاده از تستر و رله ساخته شده توسط شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر، تست عملی شده است. نتایج تست‌های نرم‌افزاری و عملی نشان از موفقیت روش پیشنهادی در تشخیص انواع نوسان توان دارند. همچنین این نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از سرعت بالایی در تشخیص خطاهای هم‌زمان با نوسان توان، برخوردار است.**

واژه‌های کلیدی: **نوسان توان، رله دیستانس، تبدیل کلارک، حفاظت سیستم‌های قدرت، حالات گذرا.**

تاریخ ارسال مقاله : ۹۸/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۴/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : فرزاد رضوی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : قزوین -خیابان دانشگاه - بلوار نخبگان - مجتمع شهید عباسپور- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

۱- مقدمه

اختلالات در سیستم‌های قدرت ممکن است باعث ایجاد نوسانات در زاویه چرخش ژنراتورها شوند که این مسئله خود منجر به ایجاد نوسان توان می‌شود. بسته به شدت اختلالات، سیستم ممکن است پایداری خود را از دست بدهد [۱, ۲]. این نوسانات در خطوط انتقال ممکن است موجب ورود امپدانس محاسبه شده به زون‌های حفاظتی رله‌های دیستانس شده و در نتیجه منجر به خاموش شدن بی‌مورد خطوط شود [۳]. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی از فانکشن قفل کننده نوسان توان[۱] در رله‌های دیستانس استفاده می‌شود.

نحوه تشخیص نوسان توان و قفل نمودن فانکشن PSB چالش بسیاری از مطالعات بوده است. بر این اساس در مطالعات روش‌های مختلفی برای تشخیص نوسان توان و فعال نمودن این فانکشن پیشنهاد شده است. مهم‌ترین روشی که بدین منظور استفاده می‌شود و در مطالعه [۴] نیز پیشنهاد شده است، ارزیابی نرخ تغییرات امپدانس می‌باشد که از ناحیه‌ای مشخص شده عبور می‌کند. مشکل این روش عدم تشخیص خطاهای متقارن که به‌صورت هم‌زمان با نوسان توان رخ می‌دهند، می‌باشد. روشی مبتنی بر ولتاژ مرکز نوسان[۲] در مقالات [۵-۷] ارائه شده است. این طرح‌ها از $V\cos\theta$ برای تشخیص نوسان توان و تمایز آن از خطا استفاده می‌کنند که در آن V مقدار ولتاژ در محل رله و θ زاویه بین سیگنال جریان و ولتاژ در محل رله می‌باشد. به دلیل تولید گذراهای الکترومغناطیسی در طول خطا، طرح تبدیل موجک برای تجزیه و تحلیل گذراها در سیستم‌های قدرت در برخی مطالعات مانند [۸-۱۰] معرفی شده است. یکی از مشکلات روش‌های تشخیص نوسان توان، تمایز بین این حالت و خطاهای سه فاز است. در واقع تشخیص خطاهای سه فاز به دلیل طبیعت متقارن آن‌ها برای تمامی تشخیص‌دهنده‌ها چالش‌برانگیز می‌باشد. بر این اساس در [۱۱] روشی ارائه شده است تا با استفاده از مقدار مؤلفه نامتقارن در لحظه شروع خطا بتوان آن را از خطا تشخیص داد. برای این روش یک مقدار آستانه نیز در نظر گرفته می‌شود و زمانی که مقدار مؤلفه نامتقارن از مقدار آستانه بیشتر شود، خطا تشخیص داده شده و رله از حالت قفل خارج می‌شود. نرخ تغییرات فرکانس لحظه‌ای در سیستم قدرت بعنوان روشی با سرعت بالا در مطالعه [۱۲]، برای تشخیص نوسان توان و خطاهای هم‌زمان استفاده شده است. روش ارائه شده در مقاله [۱۳] از تغییرات مقدار مؤثر جریان[۳] جهت تشخیص نوسان توان و تمایز آن از خطاهای هم‌زمان استفاده کرده است. در مقاله [۱۴] یک روش تخمین نمونه و محاسبه خطا مبتنی بر بسط سری تیلور برای تشخیص سریع نوسان توان استفاده شده است. این روش قابلیت تشخیص انواع مختلف خطا را دارد. روش ماشین بردار پشتیبان[۴] در [۱۵] و خطوط جبران شده سری در [۱۶] نیز جزء طرح‌هایی هستند که برای تشخیص نوسان توان پیشنهاد گردیده‌اند. در [۱۷]، یک طرح جدید بر اساس ترکیبی از کوواریانس سیگنال‌های جریان با روش تجمعی برای شناسایی نوسان توان و خطاهای هم‌زمان با نوسان توان معرفی شده است. طرح‌های پیشنهاد شده در [۱۸, ۱۹]، از رویکردهای ریاضی مانند تکنیک‌های مورفولوژی برای تمایز بین شرایط خطا و نوسان توان استفاده کرده‌اند. با این وجود به دلیل استفاده از روابط پیچیده ریاضی، پیاده‌سازی این روش‌ها در عمل با چالش همراه است. در [۲۰] روشی مبتنی بر مؤلفه‌های تحمیلی پیشنهاد شده است که دارای حساسیت کمتری به خطاهای هم‌زمان با نوسان توان هستند. بر این اساس در [۲۱] از روش عصبی-فازی برای تشخیص و بلاک نوسان توان استفاده شده است. در مقاله [۲۲] روشی بر اساس نرخ تغییرات مقدار متوسط توان ظاهری ارائه شده است. همچنین مقاله [۲۳] روشی بر اساس سرعت تغییرات مولفه منفی توان را ارائه داده است.

با بررسی مطالعات مختلف، مشخص است که تشخیص خطاهای متقارن و تمایز آن از نوسانات توان یکی از چالش‌های عمده الگوریتم‌های قفل کننده نوسان توان به شمار می‌رود. همچنین حجم محاسبات بالا یکی از دلایل طولانی‌تر شدن زمان تشخیص نوسان توان و در نتیجه عدم کاربرد صنعتی بسیاری از روش‌های پیشنهاد شده می‌باشد. بر این اساس، در مقاله حاضر یک روش جدید بر اساس تبدیل کلارک[۵] برای تشخیص نوسان توان پیشنهاد شده است. روش ارائه شده قابلیت تشخیص انواع نوسانات توان و خطاهای متقارن و نامتقارن هم‌زمان را دارا می‌باشد. به‌علاوه به دلیل پردازش مستقیم جریان‌های شبکه در خروجی تبدیل کلارک، حجم محاسبات در این روش پایین بوده و در نتیجه از سرعت بالایی برخوردار است. برای پیاده‌سازی روش ارائه شده، ابتدا حالت‌های مختلف نوسان توان و خطاهای هم‌زمان در نرم‌افزار DIgSILENT شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از داده‌های ماتریسی به‌دست آمده از سیگنال جریان، الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم‌افزار Matlab و با استفاده از تبدیل کلارک پیاده‌سازی شده است. روش بیان شده بر روی شبکه ۳۹ باسه استاندارد و در شرایط انواع نوسانات توان و خطاهای مختلف هم‌زمان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از اعمال روش پیشنهادی نشان از دقت این روش در تشخیص انواع نوسان توان شامل نوسان توان پایدار، نوسان توان ناپایدار و نوسان توان مولتی مد و انواع خطاهای همزمان با آن دارند. همچنین این روش به‌صورت عملی و با استفاده از تستر و رله ساخته شده در شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر تست و با روش‌های صنعتی موجود در سایر رله‌های حفاظتی مقایسه شده است. نتایج تست عملی نشان از برتری این روش در تشخیص انواع نوسان توان با زمان‌های کوتاه‌تر نسبت به روش‌های موجود در رله‌های حفاظتی دارد. همچنین به دلیل استفاده از روابط ریاضی ساده، این روش قابلیت پیاده‌سازی به صورت عملی را بر روی رله‌های حفاظتی دارا می‌باشد.

ساختار این مقاله بدین شکل می‌باشد. در بخش دوم، روش جدید پیشنهادی و چگونگی عملکرد آن برای تمایز بین نوسان توان و خطاهای هم‌زمان با بهره‌گیری از تبدیل کلارک ارائه شده است. در بخش سوم به ارزیابی نرم‌افزاری روش پیشنهادی پرداخته شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

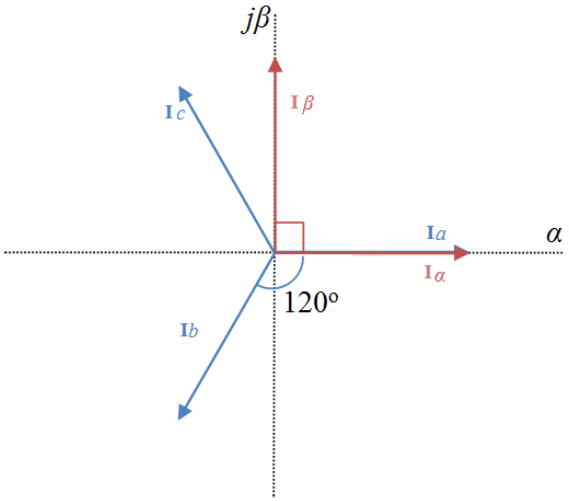
بر این اساس در این بخش، روش پیشنهادی در انواع مختلف نوسان توان و خطاهای همزمان با آن، بر روی یک شبکه نمونه مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. در بخش چهارم، روش پیشنهادی به‌صورت عملی تست و با روش‌های موجود در رله‌های حفاظتی مقایسه شده است.

۲- روش جدید

۲-۱- روش جدید پیشنهادی برای تشخیص نوسان توان و انواع خطای همزمان با آن

همان‌طور که بررسی مطالعات گذشته نشان داد، یکی از مشکلات تشخیص نوسان توان در رله‌های حفاظتی، حجم بالای محاسبات انجام شده توسط این رله‌ها و تشخیص خطای همزمان با نوسان توان است. بنابراین توسعه روشی که با محاسبات ساده بتواند نوسان توان را در زمان کوتاه تشخیص دهد، ضروری است. بر این اساس در این مقاله محاسبه متوسط سیگنال‌های جریان در خروجی تبدیل کلارک برای تشخیص نوسان توان و خطای همزمان با آن پیشنهاد می‌شود.

تبدیل کلارک روشی برای ساده‌سازی و تحلیل مدارات سه فاز است. این تبدیل شبکه سه فاز را به یک شبکه دو فاز تبدیل می‌کند که باعث سادگی در محاسبات و تحلیل‌ها می‌شود. تبدیل کلارک از نظر مفهومی مشابه تبدیل $d-q-0$ است. شکل (۱) فازورهای جریانی را در خروجی تبدیل کلارک (محورهای α و β) نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، در قاب مرجع خنثی، توزیع جریان سه محور ساکن I_a، I_b و I_c برابر با ۱۲۰ درجه است. با اعمال تبدیل کلارک، I_α در جهت فاز I_a می‌باشد و این جریان به اندازه ۹۰ درجه نسبت به I_β اختلاف فاز دارد. با این وجود اندازه پریونیت بردارهای I_α و I_β برابر است.



شکل (۱): قاب‌های مرجع ساکن سه فاز و دو فاز

جریان‌های سه فاز روی محورهای a، b و c با زمان تغییر می‌کنند و می‌توان آن‌ها را به‌صورت جبری به جریان‌های دو فاز تبدیل کرد که روی محورهای α و β با تبدیل رابطه (۱) تغییر می‌کنند.

$$T_{\alpha\beta0}=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix} \qquad (۱)$$

معکوس این تبدیل را که در رابطه (۲) نشان داده شده است، می‌توان برای تبدیل مقادیر از دو فاز به سه فاز به کار برد.

$$T_{\alpha\beta0}^{-1}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1\\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1\\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1\end{bmatrix} \qquad (۲)$$

لازم به ذکر است که مؤلفه صفر تبدیل کلارک، مشابه مؤلفه توالی صفر در تبدیل مؤلفه‌های متقارن است؛ مثلاً برای جریان‌های I_a ، I_b و I_c مؤلفه توالی صفر برای هر دو تبدیل کلارک و مؤلفه‌های متقارن برابر با $\frac{1}{3}(I_a+I_b+I_c)$ است.

با استفاده از ماتریس‌های تبدیل کلارک (روابط (۱) و (۲)) جریان‌های سه فاز رابطه (۳) که از طریق ترانسفورماتورهای جریان وارد رله‌های حفاظتی شده است، به حوزه محورهای α و β وارد شده و جریان‌های I_α، I_β و I_0 مطابق رابطه (۴) حاصل می‌شوند.

$$\begin{bmatrix}I_a\\ I_b\\ I_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_m\cos(\omega t-\delta)\\ I_m\cos(\omega t-\delta-\frac{2\pi}{3})\\ I_m\cos(\omega t-\delta+\frac{2\pi}{3})\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

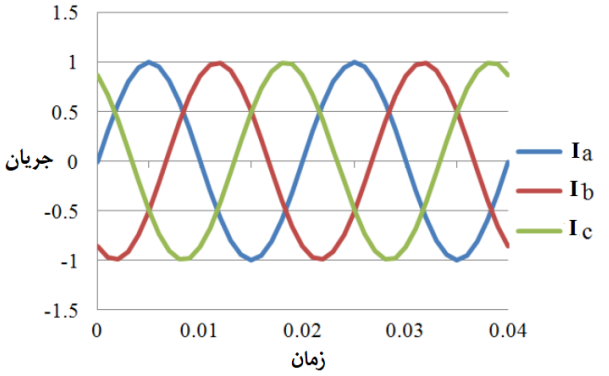
$$\begin{bmatrix}I_\alpha\\ I_\beta\\ I_0\end{bmatrix}=T_{\alpha\beta0}\begin{bmatrix}I_a\\ I_b\\ I_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_m\cos(\omega t-\delta)\\ I_m\sin(\omega t-\delta)\\ 0\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

با اعمال تبدیل کلارک بر روی جریان‌های سه فاز، مطابق رابطه (۴) می‌توان مشاهده نمود که I_α یک تابع کسینوسی، I_β یک تابع سینوسی و I_0 برابر با صفر است. بنابراین با اعمال تبدیل کلارک بر روی خروجی ترانس‌های جریان رله‌های حفاظتی، شکل موج‌های دیده

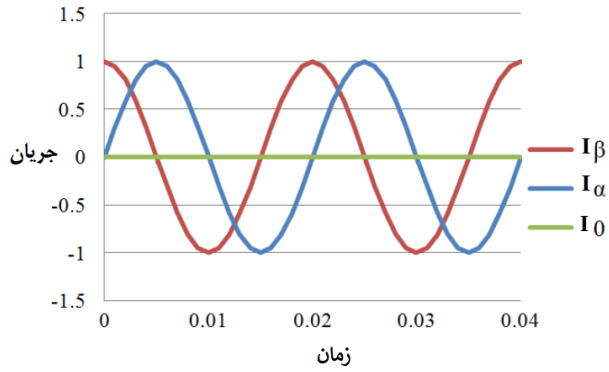
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

شده توسط فانکشن تشخیص نوسان توان از شکل (۲) به شکل (۳) تغییر خواهد نمود.



شکل (۲): جریان‌های سه فاز در حوزه زمان



شکل (۳): جریان‌های شبکه در خروجی تبدیل کلارک

به‌منظور محاسبه متوسط سیگنال‌های جریان در خروجی تبدیل کلارک، با استفاده از یک پنجره نمونه‌برداری از نوع Moving Data Windows که طول آن مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود، به‌طور مجزا از جریان‌های I_α و I_β نمونه‌برداری می‌شود.

$$window's\ length = \frac{F_s}{F_f} \qquad (۵)$$

در این رابطه F_s فرکانس نمونه‌برداری (مشابه بسیاری از رله‌های دیجیتال صنعتی، مقدار فرکانس نمونه‌برداری استفاده شده در این مقاله ۱۰ کیلوهرتز است) و F_f فرکانس پایه سیستم می‌باشند.

مطابق رابطه (۶) داده‌های نمونه‌برداری شده در پنجره سیگنال، تشکیل یک ماتریس داده می‌دهند که با استفاده از روابط (۷) و (۸) میانگین سیگنال‌های استخراج شده به دست می‌آید.

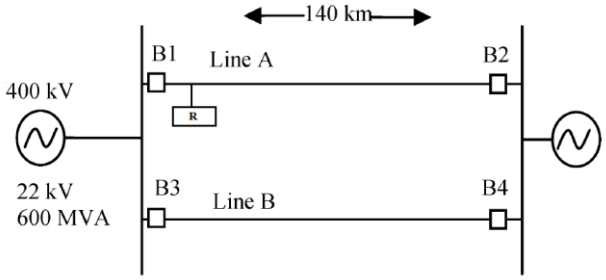
$$A_q = \left[a_{1,q}, a_{2,q}, ..., a_{i,q}\right] \qquad (۶)$$

$$Ave(S_q(t)) = \frac{1}{N}\sum_{m=k-N+1}^{K} S(m) \qquad (۷)$$

$$T = \frac{1}{F_f} \qquad (۸)$$

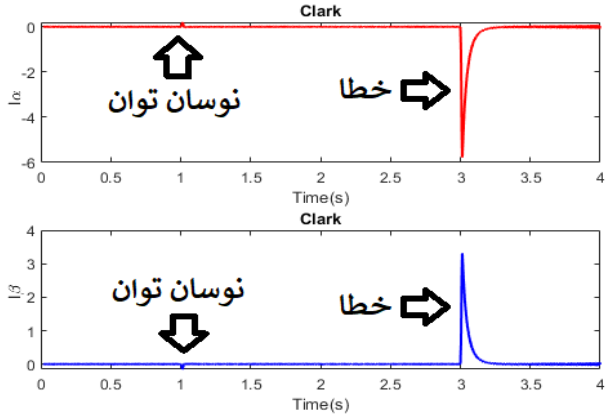
در این روابط A_q ماتریس نمونه‌های اخذ شده از سیگنال q (I_α یا I_β) و $a_{i,q}$ نمونه iام اخذ شده از این سیگنال است. همچنین $S_q(t)$ سیگنال q ورودی در حوزه کلارک است.

به‌منظور مشاهده سیگنال‌های خروجی رابطه (۷) و تصمیم‌گیری در مورد شرط تشخیص خطا در روش پیشنهادی، از شبکه نمونه ۴۰۰(kV) شکل (۴) استفاده شده است [۲۴].



شکل (۴): شبکه دو سو تغذیه ۴۰۰ کیلوولت نمونه

در شبکه نمونه شکل (۴)، یک رله دیستانس برای حفاظت خط A قرار داده شده است. به‌منظور ایجاد نوسان توان بر روی خط A کلیدهای قدرت در خط موازی B در ثانیه ۰.۵ باز می‌شوند. برای شبیه‌سازی خطای همزمان با نوسان توان یک خطای سه فاز متعادل در ثانیه سوم بر روی خط A اعمال شده است. شکل (۵) متوسط سیگنال‌های جریان را در محورهای α و β نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، مقدار متوسط به‌دست آمده از محورهای α و β در زمان نوسان توان، تقریبا صفر است. این در صورتی است که این مقدار در زمان خطا زیاد می‌شود. با استفاده از این ویژگی و با انتخاب مناسب مقادیر آستانه برای مقادیر متوسط جریان‌های I_α و I_β می‌توان نوسان توان و خطای همزمان با نوسان توان را با دقت و سرعت بسیار بالا تشخیص داد. بدین منظور شرط تشخیص نوسان توان و خطاهای همزمان با آن به‌صورت رابطه (۹) پیشنهاد می‌شود.



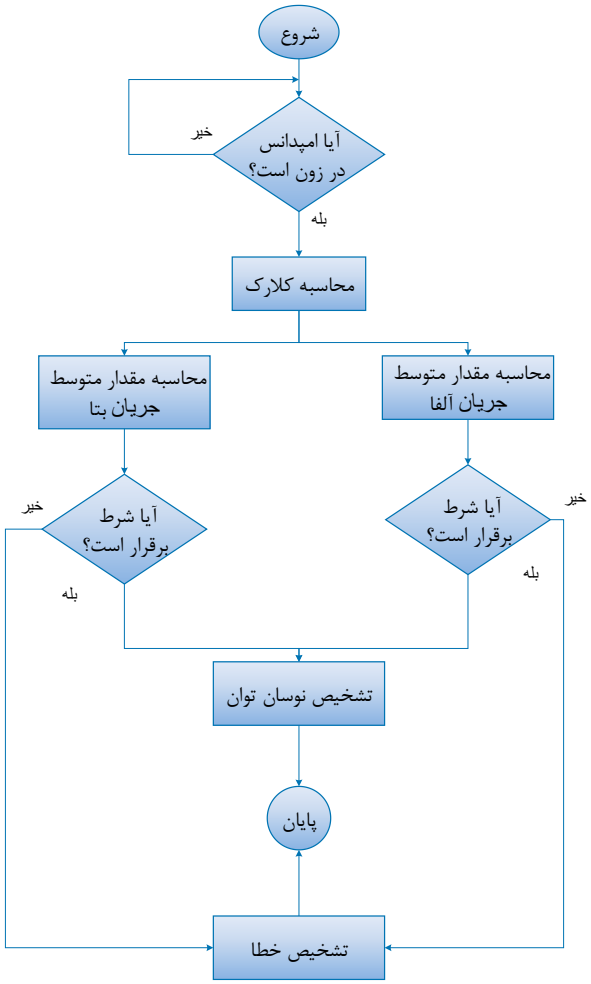
شکل (۵): تغییرات I_α و I_β در زمان نوسان توان و خطا

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

$$If \quad K_1 < I_\alpha < K_2 \quad \text{PSB Detection}$$
$$\text{or} \qquad (۹)$$
$$If \quad K_1 < I_\beta < K_2 \quad \text{PSB Detection}$$

در این رابطه K_1 و K_2 مقدار آستانه برای مقادیر متوسط جریان‌های I_α و I_β هستند. نحوه محاسبه مقادیر آستانه در قسمت بعد شرح داده شده است.

بنابراین به‌منظور تمایز نوسان توان از خطای دائم، شرط ارائه شده در رابطه (۹) بررسی می‌شود. اگر این شرط برقرار باشد، نوسان توان شناسایی می‌شود و در غیر این صورت خطا تشخیص داده خواهد شد. الگوریتم بعد از تشخیص نوسان توان تا زمانی که امپدانس در زون سوم رله دیستانس قرار دارد به کار خود ادامه می‌دهد تا در صورت رخداد خطای همزمان با نوسان توان و بر هم خوردن شرط نوسان توان بتواند خطای همزمان با نوسان توان را تشخیص دهد. لازم به ذکر است همان‌طور که از روابط ارائه شده به‌ویژه شرط خطای همزمان رخ داده با نوسان توان که در رابطه (۹) آورده شده است، مشخص است، تشخیص نوسان توان در روش پیشنهادی مستقل از تنظیمات رله‌های دیستانس می‌باشد. بر اساس مطالب بیان شده، شکل (۶) الگوریتم روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۶): الگوریتم روش پیشنهادی

۲-۲- نحوه محاسبه مقادیر آستانه

در روش پیشنهادی در این مقاله، بمنظور تعیین مقدار آستانه از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. بدین منظور انواع نوسان توان و انواع خطاهای همزمان با نوسان توان از دیدگاه محل وقوع خطا و زمان شروع خطا با توجه به موارد نشان داده شده در جدول (۱) شبیه‌سازی شده است. براساس مقادیر ارائه شده در جدول (۱)، حداکثر مقدار I_α و I_β در طی نوسانات توان با فرکانس‌های مختلف و نیز حداقل مقدار I_α و I_β پس از ایجاد خطا در پانزده مورد ارائه شده در این جدول باید تعیین گردد.

جدول (۱): موارد شبیه‌سازی‌شده برای به دست آوردن مقدار آستانه

مورد مطالعه	مقدار فرکانس نوسان توان (Hz)	فاصله خطا از رله R(Km)	زمان اعمال خطا (S)
۱	۱	۵	۱/۵
۲	۱	۷۵	۱/۷۵
۳	۱	۱۳۵	۲
۴	۲	۵	۰/۷۵
۵	۲	۷۵	۰/۸۷۵
۶	۲	۱۳۵	۱
۷	۳	۵	۰/۸۳
۸	۳	۷۵	۰/۹۱۵
۹	۳	۱۳۵	۱
۱۰	۴	۵	۰/۶۲۵
۱۱	۴	۷۵	۰/۶۸۷
۱۲	۴	۱۳۵	۰/۷۵۰
۱۳	۵	۵	۰/۵
۱۴	۵	۷۵	۰/۵۵
۱۵	۵	۱۳۵	۰/۶

جدول (۲): مقدار حداکثر و حداقل I_α و I_β در موارد ۱ تا ۱۵

موردمطالعه	مقدار حداکثر I_α	مقدار حداکثر I_β	مقدار حداقل I_α	مقدار حداقل I_β
۱	۰/۲	۰/۱۵	۰/۹	۰/۹۲
۲	۰/۳	۰/۱	۰/۸۶	۰/۸۸
۳	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۷	۰/۷۲
۴	۰/۳۷	۰/۱۵	۰/۹۳	۰/۹۵
۵	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۸۴	۰/۸۶
۶	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۷۲	۰/۷۴
۷	۰/۸۳۵	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۹۱
۸	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۸۵	۰/۸۷
۹	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۷۱	۰/۷۳
۱۰	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۹۲	۰/۹۴
۱۱	۰/۵	۰/۳۶	۰/۸۷	۰/۸۹
۱۲	۰/۷۸	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۷۴
۱۳	۰/۷۹	۰/۶۴	۰/۹۱	۰/۹۳
۱۴	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۹
۱۵	۰/۸۰	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۵

مقادیر حداکثر و حداقل مقدار I_α و I_β در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است، حداکثر مقدار I_α و I_β در زمان نوسانات توان و قبل از شروع خطا ۰/۸۳۵ و ۰/۸۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

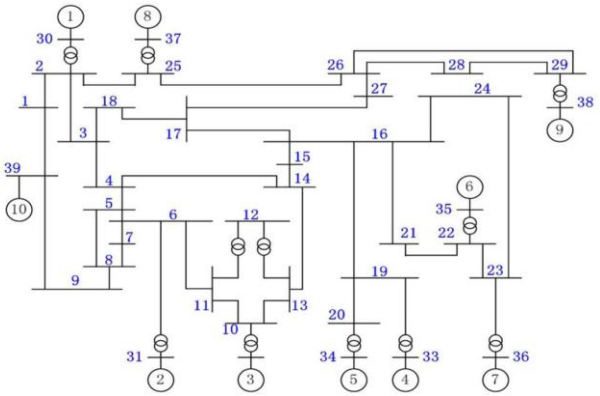
است. درحالی‌که حداقل مقدار I_α و I_β در زمان شروع خطا ۰/۹۳ و ۰/۹۵ است. با توجه به جدول (۲) مقادیر آستانه در این مقاله برای I_α و I_β بازه ۱- تا ۱ در نظر گرفته شده است.

۳- ارزیابی نرم‌افزاری روش پیشنهادی

۳-۱- معرفی شبکه نمونه

به‌منظور ارزیابی و تست روش پیشنهادی در این مقاله از شبکه ۳۹ باسه استاندارد IEEE استفاده شده است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل (۷) نشان داده شده است [۲۵]. این شبکه شامل ۳۹ باس و ۱۰ ژنراتور می‌باشد. ۱۹ بار موجود در این شبکه ۶۱۵۰.۱ مگاوات توان اکتیو و ۱۲۳۳.۹ مگاوار توان راکتیو مصرف می‌کنند.

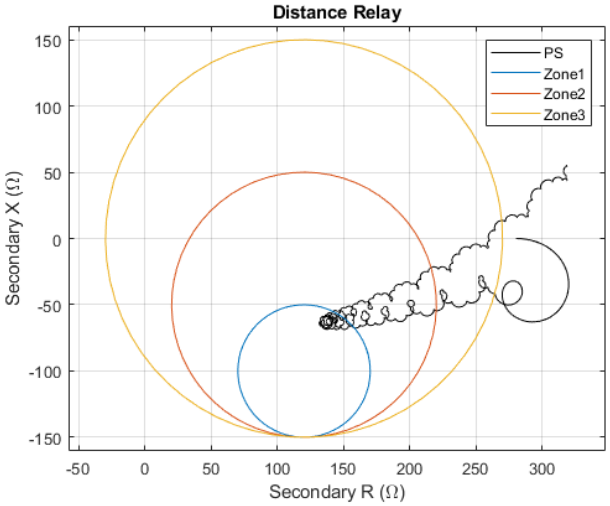
رله دیستانس مورد نظر برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، بر روی باس ۲۶ و برای حفاظت خط ۲۶-۲۹ قرار داده شده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی ابتدا انواع نوسانات توان و خطاها در نرم‌افزار DIgSILENT بر روی شبکه نمونه شکل (۷)، اعمال شده‌اند. در ادامه از سیگنال‌های جریان در هر سه فاز نمونه‌برداری می‌شود. این نمونه‌ها در محیط نرم‌افزار Matlab و با اعمال تبدیل کلارک جهت تشخیص نوسان توان و تمایز نوسان توان از خطاهای هم‌زمان مطابق روش پیشنهادی، استفاده شده است.



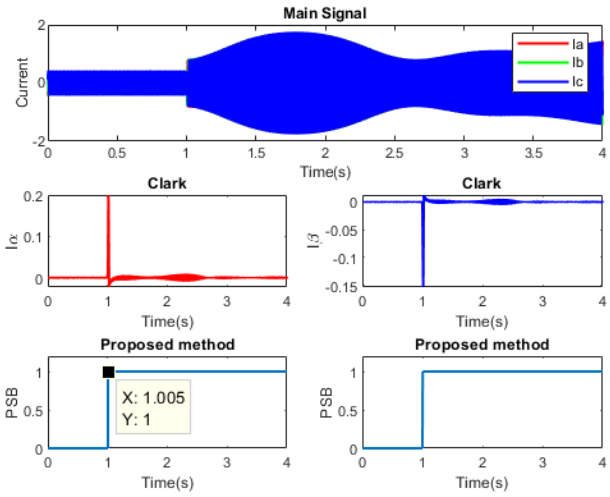
شکل (۷): دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۹ باس IEEE استاندارد

۳-۲- مورد مطالعه ۱: نوسان توان پایدار

به‌طورکلی نوسان توان زمانی ایجاد می‌شود که زاویه روتور ژنراتورها در پاسخ به تغییرات در اندازه و جهت بار، کلیدزنی خط، از دست رفتن تحریک ژنراتور و خطاها نسبت به هم جلو یا عقب می‌افتد. در این حالت اگر ژنراتور دچار لغزش قطب نشده و سیستم به حالت جدیدی از تعادل برسد، نوسان توان پایدار رخ داده است. در این قسمت و برای شبیه‌سازی شرایط نوسان توان پایدار بر روی خط ۲۶-۲۹ کلیدهای قدرت در خطوط موازی ۲۶-۲۸ و ۲۸-۲۹ در ثانیه ۰.۵ باز می‌شوند. شکل (۸) ورود نوسان توان به زون‌های رله دیستانس را نشان می‌دهد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط نوسان توان پایدار در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، نوسان توان پایدار در ۵ میلی‌ثانیه توسط الگوریتم پیشنهادی، به‌درستی تشخیص داده شده و رله قفل شده است.



شکل (۸): ورود نوسان توان به زون‌های رله دیستانس



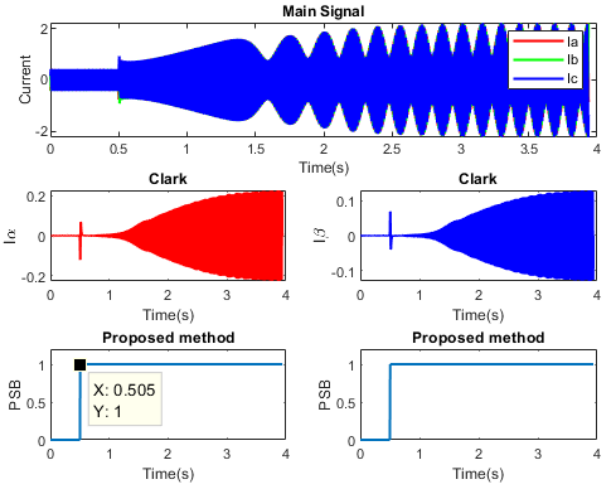
شکل (۹): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در طول نوسان توان پایدار

۳-۳- مورد مطالعه ۲: نوسان توان ناپایدار

به‌طورکلی الگوریتم‌های PSB در رله‌های دیستانس باید نوسان توان ناپایدار را تشخیص داده و عملکرد رله را قفل کنند. نوسان توان ناپایدار زمانی در سیستم قدرت به وجود خواهد آمد که وقوع اغتشاشات بیان شده در قسمت قبل باعث شود یک ژنراتور یا گروهی از ژنراتورها لغزش قطب را تجربه کنند. برای شبیه‌سازی شرایط نوسان توان ناپایدار بر روی خط ۲۶-۲۹ یک بار بزرگ در ثانیه ۰.۵ بر روی باس ۲۶ اعمال شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی این نوع نوسان توان را هم در ۵ میلی‌ثانیه با موفقیت تشخیص داده و رله را به‌درستی قفل کرده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

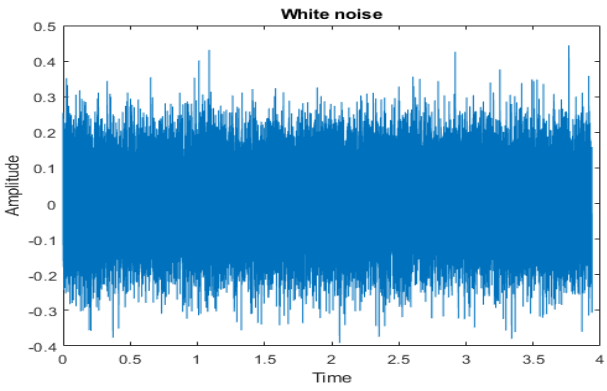


شکل (۱۰): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در طول نوسان توان ناپایدار

۳-۴- مورد مطالعه ۳: نوسان توان ناپایدار همراه با نویز گوسی سفید

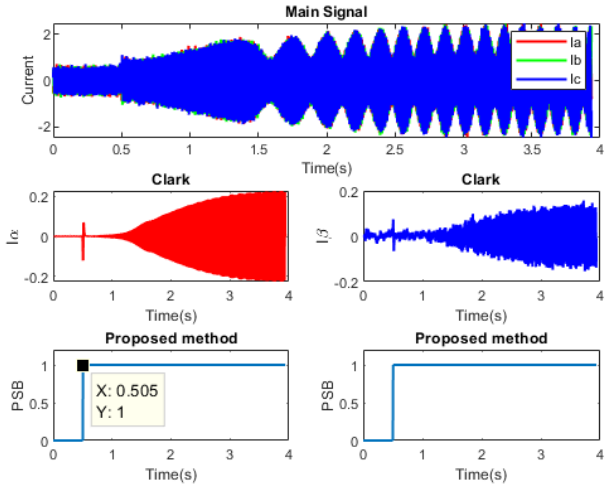
در مهندسی برق و پردازش سیگنال، نویز سفید به سیگنالی گفته می‌شود که توان آن به‌طور یکنواخت در همه فرکانس‌ها، توزیع شده باشد. به همین دلیل به آن «سفید» می‌گویند، زیرا تابع چگالی طیف توان آن در همه فرکانس‌ها مقداری تقریباً ثابت دارد (مانند نور سفید). تابع خود همبستگی نویز سفید به‌صورت تابع دلتای دیراک است. نویز سفید، ذاتاً یک فرایند اتفاقی[۶] است. بنابراین، یک مدل آماری برای سیگنال‌ها و منابع سیگنال است، نه یک سیگنال خاص. نویز سفید به هر سیگنال گسسته در زمان[۷]، که نمونه‌های آن دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی ناهمبسته که دارای میانگین صفر و واریانس متناهی هستند هم گفته می‌شود. بسته به کاربرد ممکن است لازم باشد نمونه‌ها مستقل و با توزیع احتمالی مشابه در نظر گرفته شوند.

نویز سفید گوسی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر روی سیگنال بگذارد. این اثرات نامطلوب می‌توانند باعث عملکرد اشتباه الگوریتم‌های تشخیص نوسان توان شوند. بدین منظور در این بخش از ارزیابی نرم‌افزاری روش پیشنهادی، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در نوسان توان ناپایدار همراه با نویز گوسی سفید بررسی می‌گردد. شکل (۱۱) نویز گوسی سفید اضافه شده به نوسان توان ناپایدار را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): نویز گوسی سفید اضافه‌شده به نوسان توان ناپایدار

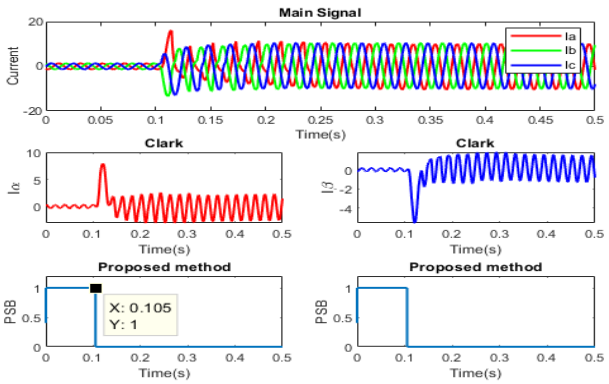
برای شبیه‌سازی شرایط نوسان توان ناپایدار بر روی خط ۲۶-۲۹ یک‌بار بزرگ در ثانیه ۰.۵ بر روی باس ۲۶ اعمال شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی نوسان توان ناپایدار همراه با نویز گوسی سفید را هم در ۵ میلی‌ثانیه با موفقیت تشخیص داده و رله را به‌درستی قفل نموده است.



شکل (۱۲): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در طول نوسان توان ناپایدار همراه با نویز گوسی سفید

۳-۵- مورد مطالعه ۴: اشباع ترانسفورماتور جریان در زمان خطای همزمان با نوسان توان

اشباع ترانسفورماتور جریان موجب کاهش شدید اندوکتانس مغناطیسی و بالطبع افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی هسته می‌گردد. از آنجا که جریان ثانویه ترانسفورماتور از تفاضل جریان اولیه و جریان مغناطیس کنندگی به دست می‌آید، افزایش شدید جریان مغناطیس‌کنندگی موجب نقصان و کاهش جریان ثانویه در بخش‌هایی از شکل موج که اشباع رخ داده است، می‌شود. این امر موجب اندازه‌گیری غیردقیق جریان سیستم می‌گردد که می‌تواند موجب عملکرد ناصحیح رله‌های حفاظتی شود. شکل (۱۳) به‌خوبی نشان می‌دهد که الگوریتم بیان شده در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان، نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان

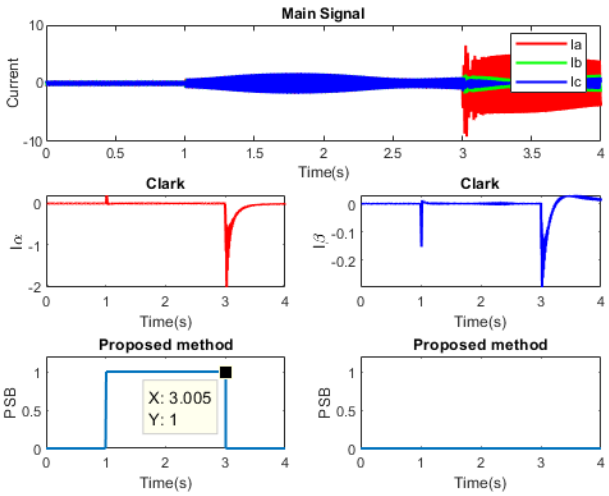
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

۳-۶- مورد مطالعه ۵: خطای تک فاز به زمین همزمان با نوسان توان

یکی از مهم‌ترین موارد در الگوریتم‌های تشخیص نوسان توان، توانایی تشخیص خطای همزمان با نوسان توان است. عدم تشخیص خطای همزمان با نوسان توان باعث ایجاد ناهماهنگی در شبکه قدرت شده و درنتیجه خروج چندین خط را در پی خواهد داشت. این پدیده ممکن است موجب ناپایداری در سیستم قدرت شود. برای جلوگیری از این مسئله، روش پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که تا زمانی که امپدانس در داخل زون سوم رله دیستانس باشد به کار خود ادامه داده و شرط تعیین شده در رابطه (۹) را مورد ارزیابی قرار خواهد داد. به محض ایجاد خطا در حین نوسان توان، این خطا با نقض شرط رابطه (۹) توسط الگوریتم پیشنهادی تشخیص داده شده و رله از حالت قفل خارج خواهد شد.

برای شبیه‌سازی این حالت یک خطای تک فاز به زمین در زمان ۳ ثانیه بر روی خط ۲۶-۲۹ اعمال شده است. شکل (۱۴) عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است، زمانی که نوسان توان در شبکه به وجود می‌آید، تابع PSB فعال شده و عملکرد رله قفل می‌شود. با این وجود به محض رخداد خطای تک فاز به زمین همزمان، خطا توسط الگوریتم تشخیص داده شده و رله از حالت قفل خارج شده است.

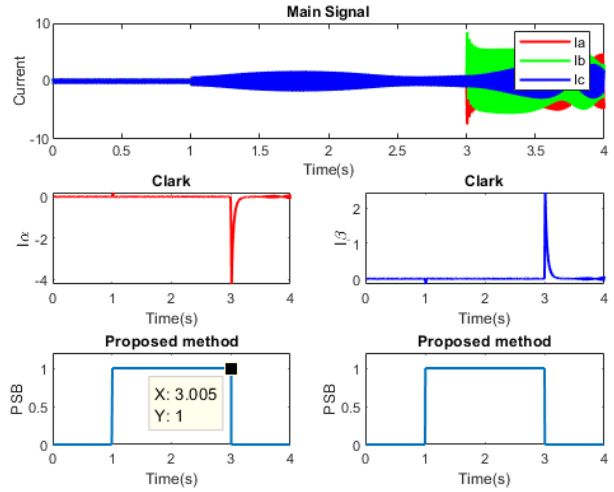
همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است، فقط مقدار I_α از مقدار آستانه فراتر رفته است و مقدار I_β درون بازه تعیین شده است. با توجه به شرط بیان‌شده در رابطه (۹) هرکدام از مقادیر I_α و I_β از بازه تعیین شده فراتر بروند خطا تشخیص داده شده و فرمان قطع کلید قدرت صادر می‌شود.



شکل (۱۴): تشخیص خطای تک فاز به زمین همزمان با نوسان توان

۳-۷- مورد مطالعه ۶: خطای دو فاز به یکدیگر همزمان با نوسان توان

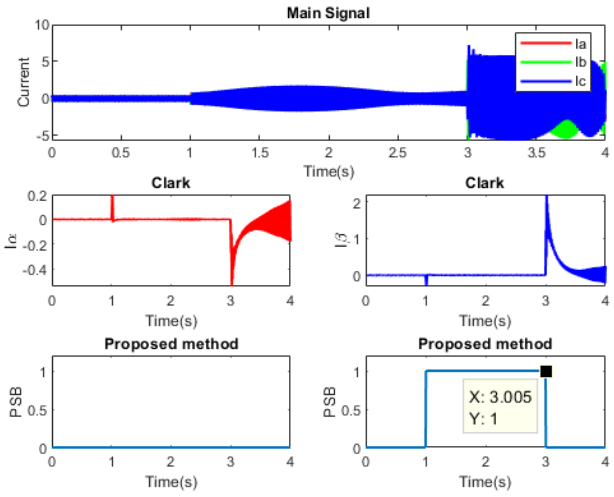
برای شبیه‌سازی این حالت یک خطای دو فاز به یکدیگر در زمان ۳ ثانیه بر روی خط ۲۶-۲۹ اعمال شده است. شکل (۱۵) عملکرد روش پیشنهادی را به ازای خطای دوفاز، نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، این خطا نیز با موفقیت توسط رله تشخیص داده شده است و رله از حالت قفل خارج گردیده است.



شکل (۱۵): تشخیص خطای دو فاز به یکدیگر همزمان با نوسان توان

۳-۸- مورد مطالعه ۷: خطای دو فاز به یکدیگر به زمین همزمان با نوسان توان

برای شبیه‌سازی این حالت یک خطای دو فاز به یکدیگر به زمین در زمان ۳ ثانیه بر روی خط ۲۶-۲۹ اعمال شده است. شکل (۱۶) عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. مانند حالات قبل در این حالت نیز خطا با موفقیت تشخیص داده شده است.

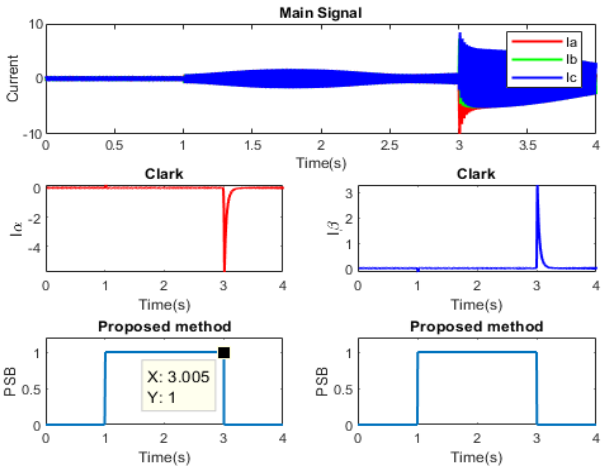


شکل (۱۶): تشخیص خطای دو فاز به یکدیگر به زمین همزمان با نوسان توان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

۳-۹- مورد مطالعه ۸: خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

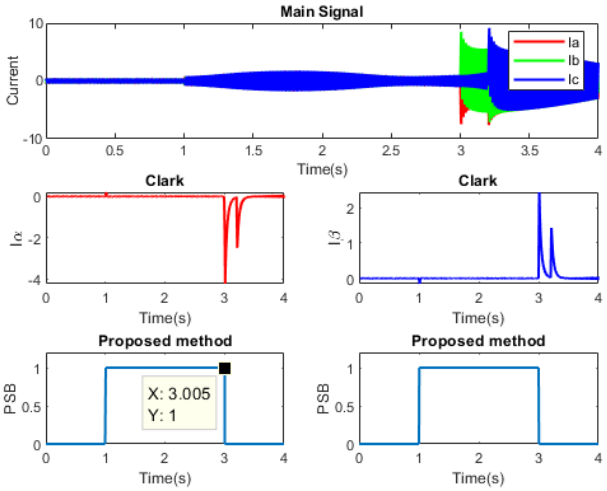
برای شبیه‌سازی این حالت یک خطای سه فاز در زمان ۳ ثانیه بر روی خط ۲۶-۲۹ اعمال شده است. شکل (۱۷) عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۷) مشخص است، زمانی که نوسان توان در شبکه به وجود می‌آید، تابع PSB فعال شده و عملکرد رله قفل می‌شود. با این وجود به محض رخداد خطای سه فاز هم‌زمان، خطا توسط الگوریتم تشخیص داده شده و رله از حالت قفل خارج شده است.



شکل (۱۷): تشخیص خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

۳-۱۰- مورد مطالعه ۹: تبدیل خطای دو فاز به سه فاز همزمان با نوسان توان

برای شبیه‌سازی این حالت یک خطای دو فاز به یکدیگر در زمان ۳ ثانیه بر روی خط ۲۶-۲۹ اعمال شده است. در ادامه یک خطای سه فاز در زمان ۳/۲ ثانیه به شبکه اعمال می‌شود. شکل (۱۸) عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

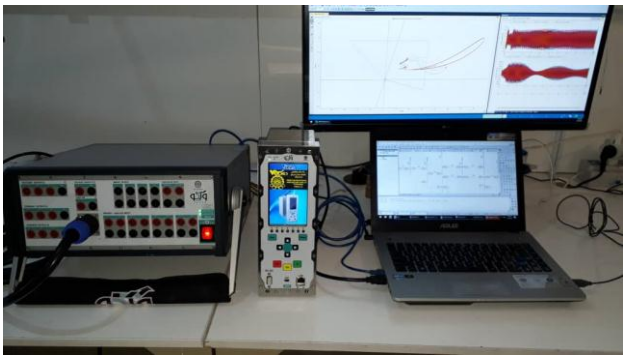


شکل (۱۸): عملکرد الگوریتم بیان‌شده در زمان تغییر خطای دو فاز به سه فاز متعادل

همانطور که از نتایج ارائه شده در شکل (۱۸) مشخص است، روش پیشنهادی توانسته است با موفقیت تبدیل یک خطا به خطای دیگر را تشخیص داده و رله را از حالت قفل خارج سازد.

۴- تست عملی روش پیشنهادی

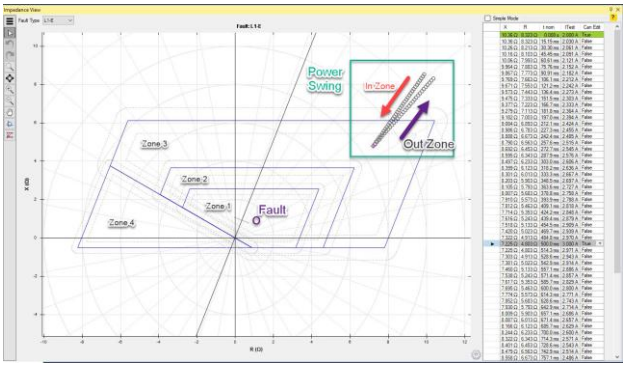
به‌منظور تست عملی روش پیشنهادی، این روش با استفاده از رله دیستانس و تستر ساخته شده در شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر، پیاده‌سازی می‌شود. رله انتخاب شده یک رله دیستانس از نوع AMR است که توسط شرکت ایرانی وبکو امیرکبیر طراحی و ساخته شده است. شکل (۱۹) بستر ایجاد شده برای انجام تست عملی فانکشن نوسان توان پیشنهاد شده در این مقاله را برای رله دیستانس نشان می‌دهد. نحوه انجام تست عملی فانکشن نوسان توان در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با استفاده از چندین نقطه خطای پشت سرهم که وارد زون سوم رله دیستانس می‌شوند و سپس از آن خارج می‌شوند، یک نوسان توان ایجاد شده است. شکل موج نوسان توان ایجاد شده در شکل (۲۱) نشان داده شده است. با ورود نوسان توان به زون سوم رله دیستانس، الگوریتم پیشنهادی شروع به کارکرده و چون شرط بیان شده در رابطه (۹) بر هم نمی‌خورد، نوسان توان به‌درستی تشخیص داده می‌شود. برای تشخیص خطای همزمان با نوسان توان، یک خطا در زون اول رله قرار داده شده است. همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است، الگوریتم بیان شده قابلیت تشخیص انواع خطا همزمان با نوسان توان را نیز به خوبی و با زمان بسیار کم دارا می‌باشد.



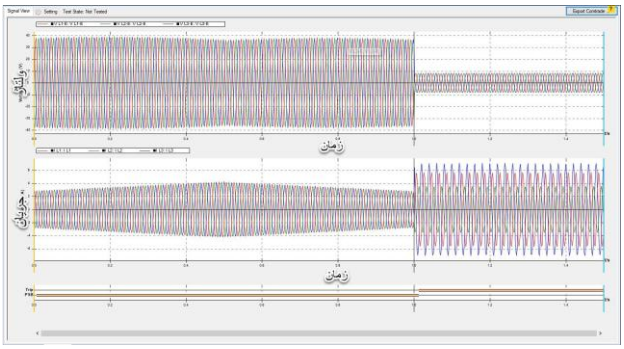
شکل (۱۹): بستر ایجاد شده برای تست فانکشن نوسان توان پیشنهادی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]



شکل (۲۰): نحوه تست فانکشن نوسان توان



شکل (۲۱): عملکرد فانکشن نوسان توان در تست عملی

جدول (۳): نتایج تست روش بیان شده

زمان تشخیص خطای همزمان با نوسان توان(ms)	زمان تشخیص نوسان توان(ms)	خطای همزمان با نوسان توان تشخیص داده شده؟	نوسان توان تشخیص داده شده ؟	نوع تست
-	۵	-	بله	نوسان توان پایدار
-	۵	-	بله	نوسان توان ناپایدار
۵	۵	بله	بله	خطای تک فاز همزمان با نوسان توان
۵	۵	بله	بله	خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

جدول‌های (۳) و (۴) نتایج مقایسه روش پیشنهادی در مقاله حاضر با روش متداول تشخیص خطا در رله‌های موجود در صنعت که در مطالعات [۲۶-۲۸] پیشنهاد شده است را ارائه می‌دهند. این مقایسه با استفاده از تست عملی و در سناریوهای متفاوت از قبیل نوسان توان، خطای تک فاز همزمان با نوسان توان و خطای سه فاز همزمان با نوسان توان انجام شده است. همه تست‌ها در شرایط یکسان و با یک نوع رله تست شده‌اند. همچنین خطاهای متفاوت تزریقی توسط دستگاه تست رله به هر دو روش نیز یکسان بوده تا بتوان نتایج را به‌طور دقیق مقایسه کرد.

همان‌گونه که از جدول‌های (۳) و (۴) مشخص است، روش معمول صنعتی، نوسان توان را در حدود ۱۰۰ میلی‌ثانیه تشخیص می‌دهد. این در حالی است که روش پیشنهادی در مقاله حاضر، همان نوسان توان را در حدود ۵ میلی‌ثانیه تشخیص می‌دهد. همچنین روش معمول صنعتی در خطای همزمان با نوسان توان عملکرد بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. بدان معنا که در هر بار تست اجرا شده، زمان تشخیص متفاوتی توسط این روش ثبت شده است. این در حالی است که روش پیشنهادی برای کلیه حالات تست شده عملکرد باثباتی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): نتایج تست در روش معمول صنعتی ارائه‌شده در [۲۶-۲۸]

زمان تشخیص خطای همزمان با نوسان توان(ms)	زمان تشخیص نوسان توان(ms)	خطای همزمان با نوسان توان تشخیص داده‌شده؟	نوسان توان تشخیص داده‌شده ؟	نوع تست
-	۱۰۳/۸	-	بله	نوسان توان پایدار
-	۱۳۹	-	بله	نوسان توان ناپایدار
۱۰۱/۷	۱۰۴/۴	بله	بله	خطای تک فاز همزمان با نوسان توان
۱۲۶/۶	۱۰۷	بله	بله	خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کارا با قابلیت اطمینان بالا برای تشخیص نوسان توان و همچنین خطاهایی که به صورت هم‌زمان با نوسان توان رخ می‌دهند، ارائه گردید. بر این اساس از تبدیل کلارک برای به دست آوردن نرخ تغییرات در سیگنال جریان استفاده شد. از آنجایی‌که نرخ تغییرات در زمان نوسان توان و لحظه شروع انواع خطاهای دائم متفاوت از همدیگر هستند، بنابراین با تعیین یک مقدار آستانه می‌توان بین نرخ تغییرات در طول نوسان توان و در زمان رخداد خطاهای هم‌زمان تمایز قائل شد. روش ارائه شده توسط انواع مختلف نوسان توان شامل نوسان توان پایدار و ناپایدار و نیز در خطای سه فاز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها اثبات نمود که روش پیشنهادی در زمان رخداد انواع نوسانات توان و خطاهای هم‌زمان عملکرد درستی را در زمان کوتاه نشان می‌دهد. همچنین این روش برخلاف روش‌های مشابه از پیچیدگی کمتری برخوردار است که استفاده از آن را در ساختار رله‌های حفاظتی ممکن می‌سازد.

مراجع

[1] J. G. Rao and A. K. Pradhan, "Supervising distance relay during power swing using synchrophasor measurements", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 17, pp. 4136-4145, 2017.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]

[2] M. McDonald, D. Tziouvaras, and A. Apostolov, "Power swing and out-of-step considerations on transmission lines," *IEEE PSRC WG D*, vol. 6, pp. 1-59, 2005.
[3] D. Novosel, G. Bartok, G. Henneberg, P. Mysore, D. Tziouvaras, and S. Ward, "IEEE PSRC report on performance of relaying during wide-area stressed conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 3-16, 2010.
[4] J. Blackburn, "Protective relaying principles and applications", *2nd Edition New York Basel Marcel Dekker ed: Inc*, 1998.
[5] P. S. R. Committee, "Power swing and out-of-step considerations on transmission lines", *IEEE Power Engineering Society*, 2005.
[6] N. Fischer, G. Benmouyal, D. Hou, D. Tziouvaras, J. Byrne-Finley, and B. Smyth, "Do system impedances really affect power swings—Applying power swing protection elements without complex system studies", *IEEE 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 108-119, 2012.
[7] P. K. Nayak, J. G. Rao, P. Kundu, A. Pradhan, and P. Bajpai, "A comparative assessment of power swing detection techniques", *IEEE Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-4, 2010.
[8] S. M. Brahma, "Distance relay with out-of-step blocking function using wavelet transform", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1360-1366, 2007.
[9] R. Dubey and S. R. Samantaray, "Wavelet singular entropy-based symmetrical fault-detection and out-of-step protection during power swing", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 10, pp. 1123-1134, 2013.
[10] C. Pang and M. Kezunovic, "Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault during power swing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2205-2212, 2010.
[11] C. Lazaro, J. Marques, G. Marchesan, and G. Cardoso, "Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing", *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 340-349, 2018.
[12] B. Taheri, S. Salehimehr, F. Razavi, and M. Parpaei, "Detection of power swing and fault occurring simultaneously with power swing using instantaneous frequency", *Energy Systems*, pp. 1-24, 2019.
[13] B. Taheri and F. Razavi, "Power swing detection using RMS current measurements", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 1831-1840, 2018.
[14] I. G. Tekdemir and B. Alboyaci, "A novel approach for improvement of power swing blocking and deblocking functions in distance relays", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 1986-1994, 2017.
[15] N. G. Chothani, B. R. Bhalja, and U. B. Parikh, "New support vector machine-based digital relaying scheme for discrimination between power swing and fault", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 1, pp. 17-25, 2014.
[16] P. K. Nayak, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "A fault detection technique for the series-compensated line during power swing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 714-722, 2013.
[17] M. H. Musa, Z. He, L. Fu, and Y. Deng, "A covariance indices based method for fault detection and classification in a power transmission system during power swing", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 105, pp. 581-591, 2019.
[18] A. Morais, G. C. Júnior, L. Mariotto, and G. Marchesan, "A morphological filtering algorithm for fault detection in transmission lines during power swings", *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 10-18, 2015.
[19] M. Daryalal and M. Sarlak, "Fast fault detection scheme for series-compensated lines during power swing", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 92, pp. 230-244, 2017.
[20] H. K. Zadeh and Z. Li, "A novel power swing blocking scheme using adaptive neuro-fuzzy inference system", *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 7, pp. 1138-1146, 2008.
[21] E. Feilat and K. Al-Tallaq, "A new approach for distance protection using artificial neural network", *IEEE 39th International Universities Power Engineering Conference*, pp. 473-477, 2004.
[22] B. Taheri, F. Razavi, and S. Salehimehr, "Power swing detection using the variation rates of the average value of apparent power", *IEEE International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, pp. 38-43, 2019.
[23] S. Salehimehr, F. Razavi, B. Taheri, and M. Parpaei, "Power swing detection using rate of change in negative sequence component of apparent power", *International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, 2019.
[24] S. Lotfifard, J. Faiz, and M. Kezunovic, "Detection of symmetrical faults by distance relays during power swings", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 81-87, 2010.
[25] M. Pai, "Energy function analysis for power system stability", *Springer Science & Business Media*, 2012.
[26] S. SIPROTEC, "Distance protection 7SA522 V4. 70", *Instruction manual*, 2011.
[27] J. Blumschein, Y. Yelgin, and M. Kereit, "Proper detection and treatment of power swing to reduce the risk of blackouts", *IEEE Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2440-2446, 2008.
[28] G. Ziegler, "Numerical distance protection: principles and applications", *John Wiley & Sons*, 2011.

زیرنویس‌ها

[1] Power Swing Blocking(PSB)
[2] Swing center voltage
[3] RMS
[4] Support vector machine
[5] Clark
[6] Stochastic Process
[7] Discrete time signal

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.10.1]