تشخیص نوسان توان و قفل نمودن زون سوم رله دیستانس با استفاده از نرم‌گیری از داده‌های نمونه برداری شده جریان

بهروز طاهری[۱] سید امیر حسینی[۲] حسین عسکریان ابیانه[۳] فرزاد رضوی[۴]

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین- قزوین- ایران
behrooztaheri1372@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق-دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان- اصفهان- ایران
hosseini.amir@gut.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
askarian@aut.ac.ir

۴- استادیار- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین- قزوین- ایران
farzad.razavi@qiau.ac.ir

چکیده: **یکی از مشکلات مهم در بهره‌برداری از رله‌های دیستانس احتمال عملکرد نادرست در زمان نوسان توان است. نوسان توان پدیده‌ای گذرا در سیستم قدرت است که می‌تواند باعث ورود امپدانس به زون سوم رله دیستانس شده و موجب عملکرد اشتباه رله دیستانس شود. برای تشخیص مناسب نوسان توان و جلوگیری از عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس، در این مقاله یک روش جدید بدون نیاز به استفاده از تبدیل فوریه با نرم‌گیری مستقیم از داده‌های نمونه‌برداری شده از سیگنال جریانپیشنهاد شده است. بر این اساس یک پنجره سیگنال تشکیل شده و از سیگنال جریان نمونه‌برداری می‌کند. در ادامه داده‌های موجود درون پنجره تشکیلیک ماتریس را خواهند داد که به راحتی می‌توان مقدار نرم آن‌ها را محاسبه کرد.از جمله ویژگی‌های روش پیشنهاد شده می‌توان به عدم نیاز به روش‌های پردازش سیگنال، سرعت بالا در تشخیص نوسان توان، تشخیص خطای همزمان با نوسان توان و کاهش محاسبات به منظور سهولت در پیاده‌سازی عملی اشاره کرد. روش پیشنهادی در شبکه ۳۹ باسه استاندارد و با استفاده از نرم‌افزارDIgSILENT و Matlab مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین این روش توسط رله دیستانس و تستر ساخته شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش بنیان وبکو امیرکبیر پیاده‌سازی عملی شده است. نتایج تست عملی روش پیشنهادی با روش‌های معمول مورد استفاده در رله‌های حفاظتی بویژه رله‌های ساخت شرکت زیمنس مقایسه عملی شده است. نتایج ارزیابی عملی، بخوبی نشان می‌دهند که روش پیشنهاد شده نسبت به روش‌های معمول صنعتی استفاده شده در رله‌های زیمنس عملکرد بهتری دارد.**

کلمات کلیدی: **نوسان توان، رله دیستانس، حفاظت سیستم‌های قدرت، حالات گذرا.**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین عسکریان ابیانه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران– تهران– خیابان حافظ– پلاک ۴۲۴– دانشگاه صنعتی امیر کبیر– دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

حفاظت از خطوط انتقال انرژی به‌ویژه در خطوط فشارقوی از اهمیت بالایی برخوردار است[۱-۳]. با این وجود رله‌های دیستانس که وظیفه حفاظت از این خطوط را بر عهده دارند، ممکن است تحت تاثیر نوسانات توان عملکرد اشتباه داشته باشند[۴]. این عملکرد نادرست ممکن است باعث قطع ناخواسته خطوط انتقال انرژی شود. خروج چندین خط انتقال انرژی از یک شبکه بزرگ برق می‌تواند باعث ناپایداری شبکه و در نتیجه منجر به خاموشی‌های سراسری در شبکه شود. نمونه‌ای از این حوادث در سال ۲۰۰۳ در مالزی و ایتالیا، در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ در مالزی و برزیل و در سال ۲۰۱۲ در شبکه غربی هند اتفاق افتاده است[۵-۹]. این نوع از خاموشی‌ها خسارات بسیاری را به شرکت‌های انتقال انرژی وارد خواهند کرد. برای جلوگیری از عملکرد ناخواسته رله‌های دیستانس از فانکشن قفل کننده نوسان توان در این رله‌ها استفاده می‌شود. قفل کننده نوسان توان یک فانکشن مکمل در رله‌های دیستانس است تا نوسان توان را تشخیص داده و مانع از عملکرد زون سوم رله دیستانس شود[۱۰].

در مطالعات روش‌های مختلفی برای تشخیص نوسان توان و ایجاد فانکشن قفل‌کننده نوسان توان پیشنهاد شده است. رایج‌ترین روش برای تشخیص نوسان توان، استفاده از نرخ تغییرات امپدانس است که در مطالعات [۱۱, ۱۲] پیشنهاد شده است. با توجه به آنکه به هنگام وقوع خطا، نرخ تغییراتامپدانس بزرگ‌تر از نرخ تغییرات امپدانس در طی نوسان توان است، لذا این روش مبتنی بر درک تفاوت در نرخ تغییرات امپدانس (ΔZ) و تمایز گذاشتن بین نوسان توان و خطا است. در طی نوسان توان آهسته(۱ هرتز)، عبور امپدانس بسیار کند است و در هر زون زمان عبور طولانی‌تر و یا مساوی f_s است[۷]. بنابراین استفاده از نرخ تغییرات امپدانس می‌تواند نوسان توان آهسته را بخوبی تشخیص داده و رله را بلاک کند، هرچند این طرح قادر به تشخیص نوسانات توان سریع (۵ هرتز) نیست ضمن آنکه این طرح قادر به تشخیص خطای اتفاق افتاده همزمان با نوسان توان نیز نمی‌باشد [۱۳-۱۷]. مقاله [۱۳] روشی براساس مقدار مقاومت دیده شده توسط رله دیستانس برای تمایز گذاشتن بین نوسان توان و خطا را پیشنهاد می‌نماید. روش ارائه شده در این مطالعه بر این اصل استوار است که مقاومت دیده شده توسط رله در زمان نوسان توان دائما در حال تغییر است در صورتی است که در زمان خطا مقدار مقاومت ثابت می‌ماند. با این وجود، این روش مدت زمان زیادی برای تشخیص نوسان توان نیاز دارد. مقاله [۱۵] روشی با استفاده از ترکیب مشخصه‌های هم مرکز و نظارت مداوم امپدانس ظاهری برای تشخیص نوسان توان را ارائه می‌دهد. مطالعه [۱۸] از ولتاژ مرکز نوسان[۱] برای تشخیص نوسان توان استفاده می‌کند. در [۱۹] از تبدیل فوریه[۲] به‌دست‌آمده براساس مولفه DC جریانی برای تشخیص خطا در هنگام نوسان توان استفاده می‌شود. در [۱۶] روشی مبتنی بر تحلیل تبدیل فوریه ارائه‌شده است.

یکی از چالش‌های تکنیک‌های استفاده‌کننده از تبدیل فوریه، نیاز به انتخاب مقدار دقیق آستانه برای شناسایی خطا است [۲۰]. همچنین این روش به دلیل نمونه‌گیری ناهمزمان و ضبط نمونه‌های محدود دارای مشکلاتی چون نشت طیفی[۳] و حصار نرده‌ای[۴] می‌باشد که کاربرد آن را محدود می‌کند[۲۱, ۲۲]. در مقاله [۲۳] از تبدیلموجک[۵] برای جبران مشکلات تبدیل فوریه استفاده شده است. این مقاله برای تشخیص نوسان توان و خطای همزمان با آن از هارمونیک‌های بدست آمده از تبدیل موجک استفاده می‌کند. در [۲۴] یک الگوریتم تبدیل موجک با سرعت بالا برای تشخیص خطای متقارن همزمان با نوسان توان استفاده‌شده است. در مطالعه [۲۵] اعمال تبدیل موجک بر روی تغییرات امپدانس برای تشخیص نوسان توان و خطاهای همزمان با آن، پیشنهاد شده است. همچنین در [۲۶] از تبدیل موجک برای تحلیل تغییرات جریان به‌منظور تشخیص خطاها با مقاومت‌های مختلف در طی نوسان توان استفاده‌شده است. در [۲۷] الگوریتمی با استفاده از شکل موج جریان برای تشخیص خطای سه فاز در هنگام نوسان توان ارائه‌شده است. این روش براساس افت معکوس در جریانDC کار می‌کند. روش یادگیری تحت نظارت ماشین بردار پشتیبان[۶] و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار[۷] در [۲۸, ۲۹] ارائه شده است. این روش‌ها به شبیه‌سازی‌های بسیاری برای آموزش رنج‌های متفاوت خطا و نوسان توان نیاز دارند. مقاله [۳۰] برای تشخیص نوسان توان از پیش‌بینی براساس رگرسیون خودکار استفاده می‌نماید. در مقاله [۳۱] یک روش برای پیش‌بینی نمونه‌های ولتاژ و جریان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی،پیشنهاد شده است. روش‌های پیش‌بینی از اختلاف بین سیگنال پیش‌بینی شده و مقدار واقعی سیگنال برای تشخیص نوسان توان استفاده می‌کنند. این روش‌هانیاز به بدست آوردن مقدار مناسب آستانه برای عملکرد مناسب دارند. روشی براساس پنجره متوسط‌گیر جریان در [۳۲] ارائه شده است. مقاله [۳۳] روشی براساس نرخ تغییرات مقدار موثر[۸] جریانی ارائه داده است. این روش با استفاده از مقدار تغییرات مقدار موثر جریان در زمان خطا و نوسان توان اقدام به تشخیص نوسان توان می‌کند.رله‌های حفاظتی بویژه رله‌های شرکت زیمنس هم‌اکنون از روش ارائه شده در مطالعات [۳۴-۳۶] برای تشخیص نوسان توان استفاده می‌نمایند که این روش براساس تغییرات امپدانس عمل می‌نماید. از جمله مزایای این روش سادگی محاسبات، تشخیص خطاهای هم‌زمان با نوسان توان، تشخیص نوسان سریع مجدد ایجاد شده پس از رفع خطا و ایجاد تمایز بین نوسانات پایدار و ناپایدارمی‌باشد. با این وجود، این روش تنها قادر به تشخیص نوسانات توان سریع تا ۱۰Hz است. ضمن آنکه به ازای نوسانات مختلف توان، زمان پاسخگویی این روش یکسان نمی‌باشد. مورد آخر در نتایج شبیه-سازی مقاله حاضر بررسی عملی شده است.

همانطور که بررسی گردید، هریک از روش‌های ارائه شده در گذشته دچار چالش‌هایی هستند که کاربرد آن‌هابویژه بصورت عملی و در رله‌های حفاظتی را محدود می‌سازد. براین‌اساس در این مقاله یک

روش جدید با استفاده از نرم‌گیری مستقیم از داده‌های نمونه‌برداری شده از سیگنال جریانپیشنهاد شده است. بدین منظور یک پنجره سیگنال تشکیل شده و از سیگنال جریان نمونه‌برداری می‌کند. در ادامه داده‌های موجود درون پنجره، تشکیلیک ماتریس را خواهند داد که به راحتی می‌توان مقدار نرم آن‌ها را محاسبه کرد. از مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به مطالعات گذشته آن است که در این روش محاسبات کمتری نسبت به دیگر روش‌ها مورد نیاز است. این مسئله روش پیشنهادی را برای پیاده‌سازی عملی مناسب می‌کند. همچنین روش بیان شده به ساختار شبکه وابسته نمی‌باشد و قابلیت تشخیص انواع خطاهای همزمان با نوسان توان را دارا می‌باشد. روش پیشنهادیبر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE به ازای حالات مختلف نوسان توان مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین روش پیشنهادی با استفاده از رله و تسترهای ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر تست عملی شده است. نتایجنشان می‌دهند که روش بیان شده عملکرد بهتری از نظر زمانی نسبت به روش معمول صنعتی استفاده شده در رله‌های زیمنس دارد. روش معمول صنعتی، نوسان توان را در حدود ۱۰۰ میلی ثانیه تشخیص می‌دهد این در صورتی است که روش بیان شده در این مقاله نوسان توان را در حدود ۳۰ میلی ثانیه تشخیص می‌دهد. همچنین روش معمول صنعتی در خطای همزمان با نوسان توان عملکرد بسیار متفاوتی از خودنشان می‌دهد. این در حالی است که روش بیان شده عملکرد یکسانی نسبت به خطاهای متفاوت دارد.

ساختار این مقاله بدین صورت می‌باشد. در بخش دوم روش جدید پیشنهاد شده در این مقاله بیان می‌شود. در بخش سوم روش جدید بیان شده برروییک شبکه نمونه و نیز با استفاده از رلهدیستانس و تستر ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت وبکو امیرکبیر تست شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- روش جدید

یکی از راه حل‌های کاهش محاسبات تشخیص نوسان توان اعمال مستقیم محاسبات بر روی داده‌های نمونه‌برداری شده و عدم استفاده از روش‌های پیچیده پردازش سیگنال است. بدین منظور، روش پیشنهادی در این مقاله از محاسبه مستقیم نرم از داده‌های نمونه‌برداری شده جریان استفاده می‌کند. برای انجام این کار ابتدا با استفاده از یک پنجره که طول آن توسط رابطه (۱) بدست می‌آید، نمونه‌برداری از سیگنال جریان در هر سه فاز به صورت جداگانه انجام می‌شود.

$$window's\ length = \frac{F_s}{F} \qquad (۱)$$

در این رابطه F_s فرکانس نمونه‌برداری و F فرکانس پایه سیستم می‌باشند.

مطابق رابطه (۲) داده‌های نمونه‌برداری شده در پنجره سیگنال تشکیل یک ماتریس داده می‌دهند که با استفاده از رابطه (۳) نرم دوم ماتریس تشکیل شده بدست می‌آید.

$$A = \left[a_1, a_2, ..., a_i\right] \qquad (۲)$$

$$\| A \|_2 = \max |_{\|x\|_2 = 1} \| Ax \|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}} \qquad (۳)$$

در این روابط A ماتریس بدست آمده از داده‌های نمونه‌برداری شده پنجره سیگنال،a داده مورد نظر، i تعداد کل داده‌هادرونپنجرهسیگنال و $\lambda_{\max}$ بزرگترین عدد λ است به طوری که $A^*A - \lambda I$ مفرد (دترمینان صفر) خواهد بود. هنگامی که A مفرد نباشد مقدار نرم از معادله (۴) بدست می‌آید.

$$\| A^{-1} \|_2 = \frac{1}{\min\limits_{\| x \|_2 = 1} \| Ax \|_2} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\min}}} \qquad (۴)$$

که در آن $\lambda_{\min}$ کوچکترین عدد λ است به طوری که $A^*A - \lambda I$ مفرد خواهد بود. پس از محاسبه نرم در هر طول پنجره، مقدار تغییرات نرم در هر فاز جریانی با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta_{Norm}(n) = | Norm(n+1) - Norm(n) | \quad for \quad n = 1...L-1 \qquad (۵)$$

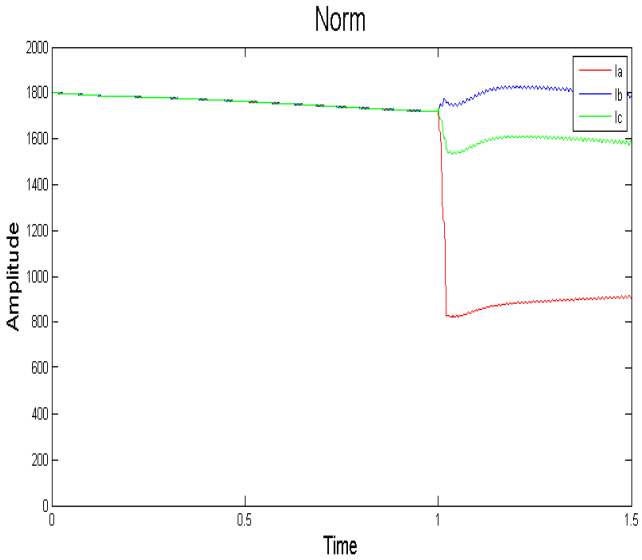
شکل (۱) تغییرات مقدار نرم در زمان وقوع همزمان نوسان توان و خطای تکفاز را که توسط روابط (۵)-(۳) محاسبه شده است، نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است، مقدار تغییرات نرم در هر سه فاز جریانی در زمان نوسان توان یکسان است. این در صورتی است که این مقدار در زمان خطا کاملا متفاوت می‌باشد.باید توجه داشت که تشخیص خطای سه فاز به دلیل ماهیت متعادل آن قالبا بسیار مشکل است. با این وجود شروط پیشنهاد شده در مقاله حاضر برای تشخیص نوسان توان، بگونه‌ای طراحی شده‌اند که به ازای حالت گذرای اولیه تمامی خطاهای دائم، این شروط نقض شده و خطای دائم به درستی تشخیص داده می‌شود. با توجه به موارد بیان شده شرط نوسان توان می‌تواند به صورت رابطه (۶) بیان شود.

$$if \quad \Delta_{Norm}(a) \simeq \Delta_{Norm}(b) \simeq \Delta_{Norm}(c) \quad PSB = True \qquad (۶)$$

که در آن Δ_{Norm} مقدار تغییرات نرم در هر فاز را نمایش می‌دهد.

بمنظور تمایز نوسان توان از خطای دائم، شرط ارائه شده در رابطه (۶) بررسی می‌شود. اگر این شرط برقرار باشد نوسان توان شناسایی می‌شود و در غیر اینصورت خطا تشخیص داده خواهد شد. لازم به ذکر است 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 بویژه شرط خطای همزمان

رخ داده با نوسان توان که در رابطه (۶) آورده شده است، مشخص است، تشخیص نوسان توان در روش پیشنهادی در مقاله حاضر مستقل از تنظیمات رله‌های دیستانس می‌باشد.



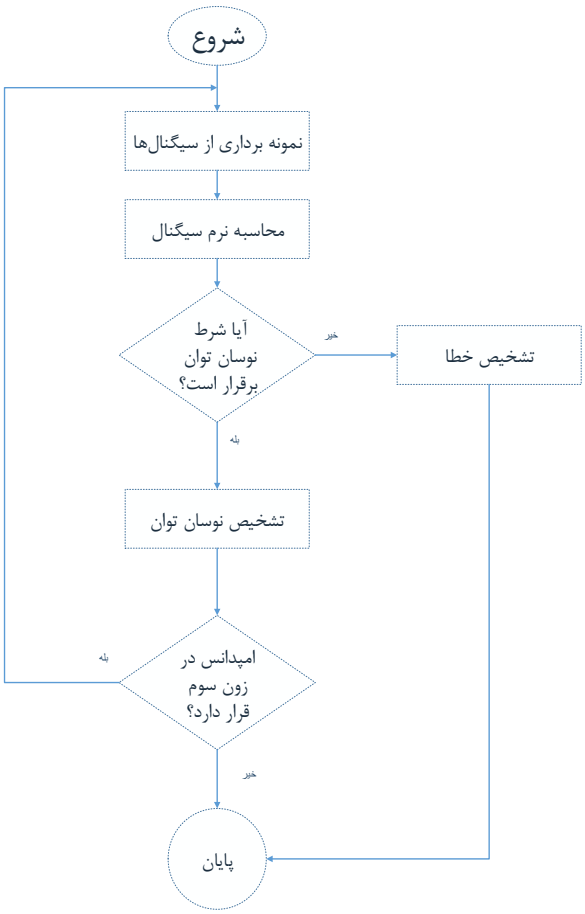
شکل (۱): تغییرات نرم در زمان نوسان توان و خطا در هر سه فاز

براساس مطالب بیان شده، شکل (۲) الگوریتم نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

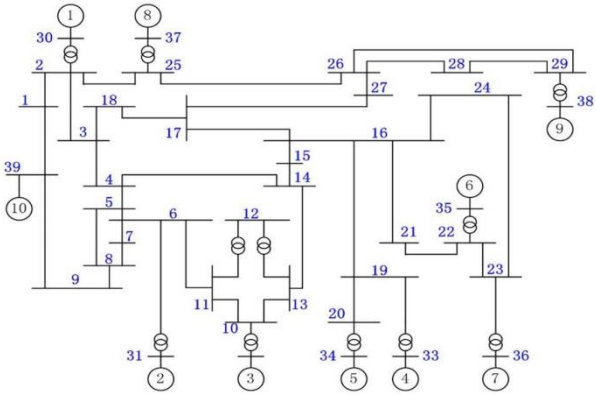
۳- تست روش بیان شده

۳-۱- تست در سیستم استاندارد

بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی، این روش بر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE که در شکل (۳) نشان داده شده است، پیاده‌سازی می‌شود. این شبکه ۲۳۰ کیلوولت و ۶۰ هرتز بوده و شامل ۳۹ باس و ۱۰ ژنراتور است. ۱۹ بار موجود بر روی شبکه در مجموع ۶۱۵۰/۱ مگاوات و ۱۲۳۳/۹ مگاوار توان مصرف می‌کنند[۳۷]. در این بخش، ارزیابی روش پیشنهادی در چهار حالت تشخیص نوسان توان، تشخیص نوسان توان همزمان با خطای امپدانس پایین، تشخیص نوسان توان همزمان با خطای امپدانس بالا و تشخیص نوسان توان Multi-modeانجام می‌شود.



شکل (۲): الگوریتم روش پیشنهادی

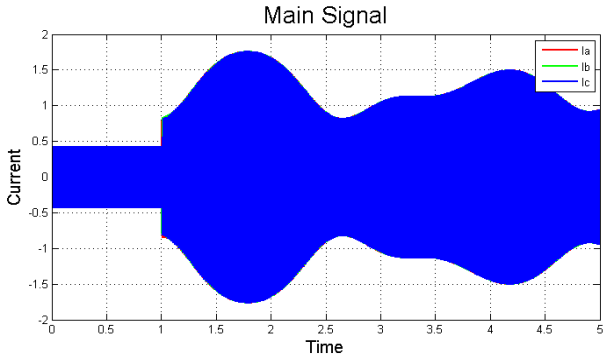


شکل (۳): شبکه ۳۹ باسه IEEE برای ارزیابی روش پیشنهادی

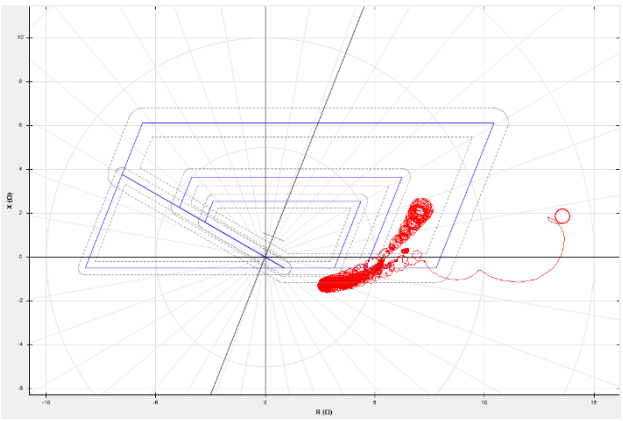
۳-۱-۱- حالت تست ۱: نوسان توان

بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی در تشخیص نوسان توان، فرض می‌شود رله مورد نظر برروی باس شماره ۲۶ قرار دارد و برای حفاظت خط ۲۶-۲۹ استفاده می‌شود. برای ایجاد نوسان توان بر روی رله دیستانس کلیدهای خطوط ۲۶-۲۸ و ۲۸-۲۹ در ثانیه ۱ باز می‌شوند. شکل (۴) نوسان توان دیده شده توسط رله دیستانس را نمایش می دهد. شکل (۵) ورود نوسان توان به زون رله دیستانس را نمایش می دهد. مشخص است که ورود نوسان توان به زون سوم رله دیستانس

مدنظر می‌تواند موجب عملکرد اشتباه رله در صورتی که فانکشن قفل کننده نوسان توان فعال نشود، گردد.



شکل (۴): نوسان توان دیده شده توسط رله دیستانس

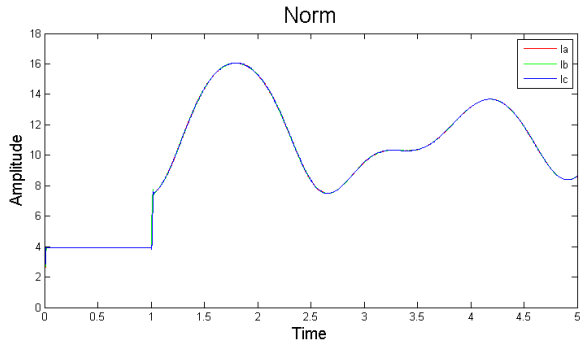


شکل (۵): ورود نوسان توان به زون‌های رله دیستانس

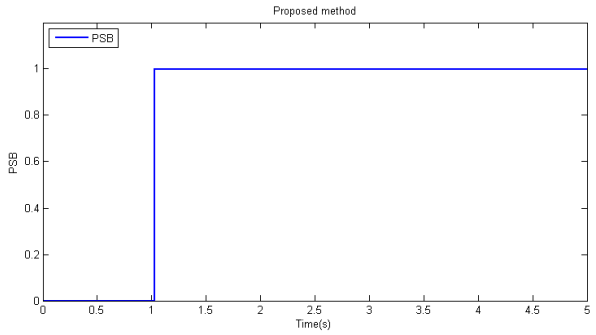
بمنظور جلوگیری از عملکرد اشتباه رله دیستانس، فانکشن قفل‌کننده نوسان توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به شناسایی نوسان توان می‌پردازد. همانطور که از شکل (۶) مشخص است، این فانکشن با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادی در مقاله حاضر، موفق شده است بعد از گذشت ۳۰ میلی‌ثانیه از ورود امپدانس محاسبه شده به زون سوم رله دیستانس، نوسان توان رخ داده را با موفقیت تشخیص دهد.

۳-۱-۲- حالت تست ۲: خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

همانطور که بررسی شد، یکی از چالش‌های مهم الگوریتم‌های تشخیص نوسان توان، داشتن عملکرد نامناسب در زمان وقوع خطای سه فاز متعادل همزمان با نوسان توان است. تشخیص خطای سه فاز به دلیل ماهیت متعادل آن قالبا بسیار مشکل است. با این وجود شروط پیشنهاد شده در مقاله حاضر برای تشخیص نوسان توان، بگونه‌ای طراحی شده‌اند که به ازای حالت گذرای اولیه تمامی خطاهای دائم، این شروط نقض شده و خطای دائم به درستی تشخیص داده می‌شود.



(الف)



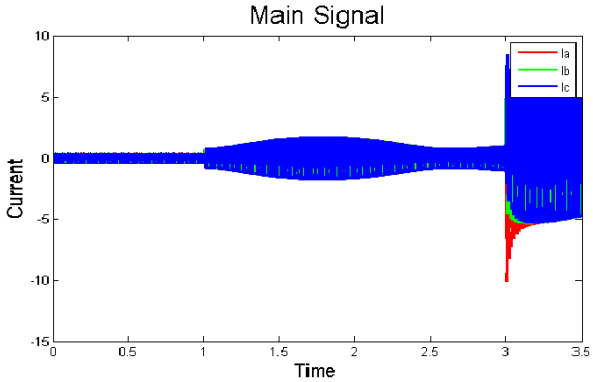
(ب)

شکل (۶): الف) مقدار تغییرات نرم در هر سه فاز ب) عملکرد رله دیستانس در زمان نوسان توان

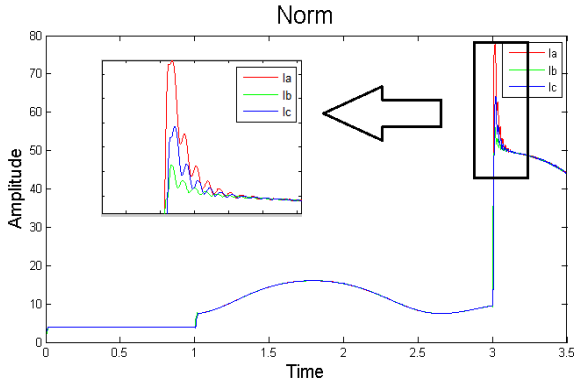
بمنظور ارزیابی موفقیت روش پیشنهادی در تشخیص همزمان نوسان توان و خطاهای سه‌فاز، مانند حالت قبل فرض می‌شود کلیدهای خطوط ۲۶-۲۸ و ۲۸-۲۹ در ثانیه ۱ باز می‌شوند. همچنین برای ایجاد خطای همزمان با نوسان توان یک خطای سه فاز در ثانیه سوم در ۲۵ درصد خط ۲۶-۲۹ قرار داده می‌شود. شکل (۷) عملکرد رله را در زمان خطای سه فاز همزمان با نوسان توان نشان می‌دهد. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که نرم گرفته شده از سیگنال جریان دارای اختلاف شده و شرط ارائه شده در رابطه (۶) را بر هم می‌زند. براین‌اساس بعد از گذشت ۳۰ میلی ثانیه خطای سه فاز رخ داده با موفقیت تشخیص داده شده است و رله از حالت بلاک خارج شده است.

۳-۱-۳- حالت تست ۳: خطای امپدانس بالا همزمان با نوسان توان

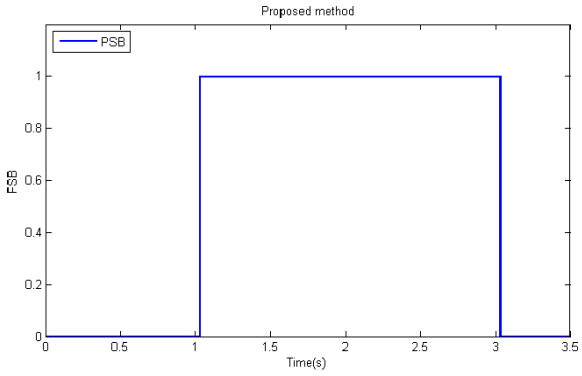
در بین خطاهای اتفاق افتاده در سیستم قدرت، خطاهای امپدانس بالا بیشترین چالش را برای تشخیص دارند [۳۸]. این خطاها عموما خطاهای تکفازی هستند که دامنه جریان آن‌ها برای عملکرد سیستم حفاظتی معمول کافی نیست[۳۹]. عدم تشخیص این نوع از خطاها می‌تواند خطراتی مانند آتش‌سوزی و آسیب به تجهیزات انتقال انرژی را ایجاد کند[۴۰, ۴۱].



(الف)



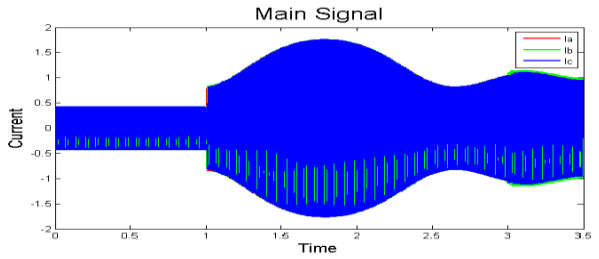
(ب)



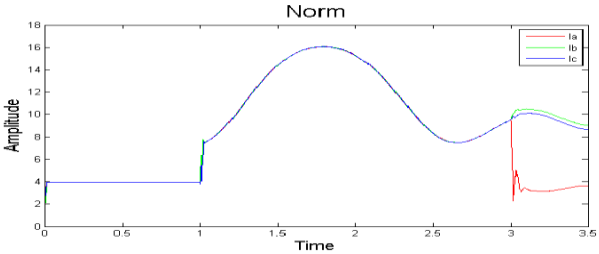
(ج)

شکل (۷): الف) شکل موج دیده شده توسط رله دیستانس ب) مقدار تغییرات نرم در هر سه فاز ج)عملکرد رله دیستانس در زمان نوسان توان و خطای سه فاز همزمان با نوسان توان

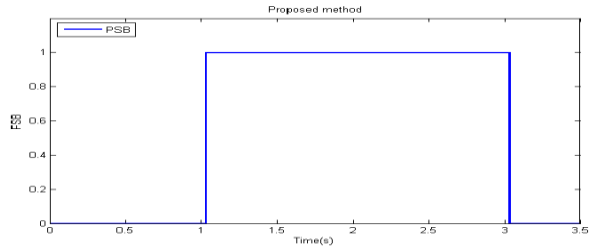
برای بررسی روش پیشنهادی نسبت به وقوع همزمان این نوع خطاها همراه با نوسان توان، یک خطا در زمان ۳ ثانیه در ۲۵ درصد خط ۲۶-۲۹ با امپدانس ۲۰۰ اهم قرار داده می‌شود. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، بعد از اعمال خطا، نرم گرفته شده از سیگنال جریان در سه فاز دچار اختلاف شده و شرط نوسان توان بهم خورده و بنابراین رله خطای رخ داده را بدرستی تشخیص می‌دهد.



(الف)



(ب)



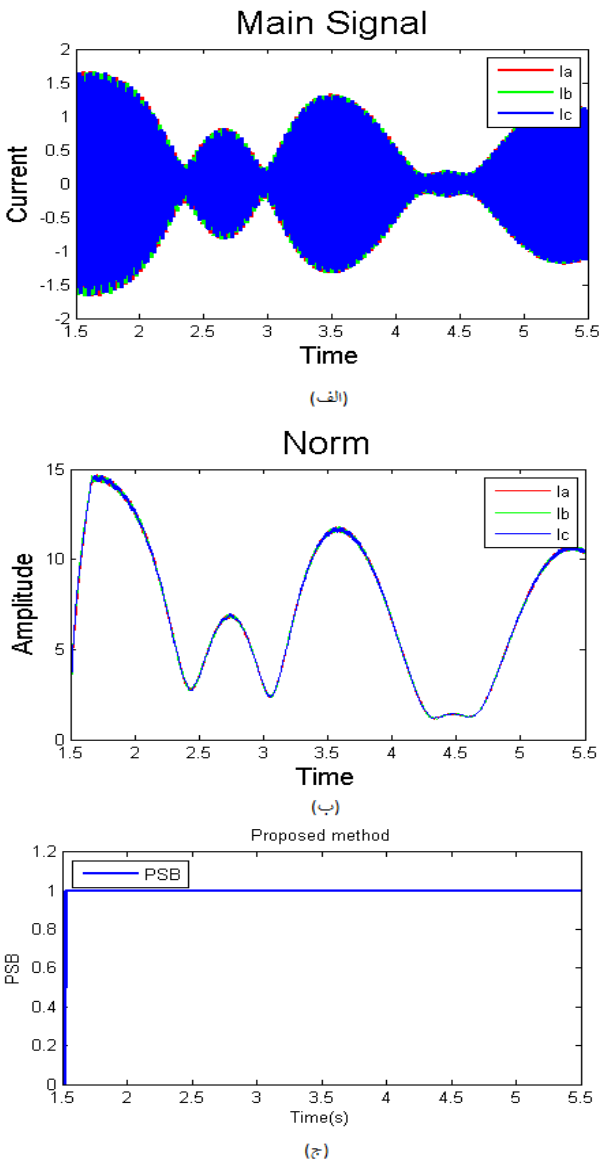
(ج)

شکل (۸): الف) شکل موج دیده شده توسط رله دیستانس ب) مقدار تغییرات نرم در هر سه فاز ج) عملکرد رله دیستانس در زمان نوسان توان و خطای امپدانس بالا همزمان با نوسان توان

۳-۱-۴- حالت تست ۴: نوسان توان Multi-mode

یکی از انواع نوسانات توان که غالبا تشخیص آن‌ها برای رله‌های حفاظتی مشکل است، نوسان توان Multi-modeمی‌باشد. این نوع نوسان زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد بیشتر از دو ژنراتور در نوسان توان دخیل باشند. در حالت مذکور ممکن است جریان از حالت سینوسی کامل خارج شود.

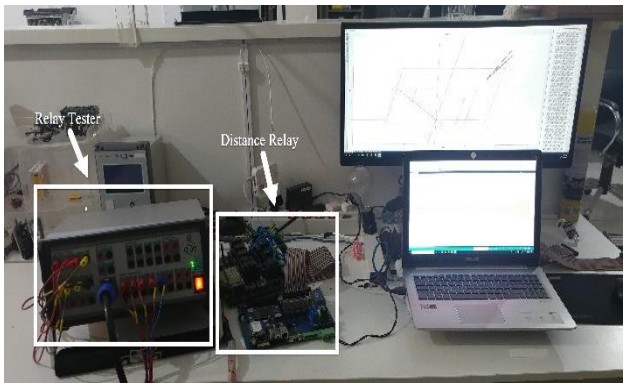
بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی در تشخیص این نوع نوسان توان، یک خطای سه فاز در لحظه t=1 در ۵۰ درصد خط ۱۴-۴ ایجاد شده و پس از ۲۰۰ میلی‌ثانیه (t=1.2) خط ۱۴-۴ از مدار خارج می‌شود. جریان خط ۱۸-۱۷ و ولتاژ آن از سمت باس ۱۷ مانیتور می‌شود. این امر موجب بروز نوسان توان بصورت Multi-mode می‌گردد که داراییک فرکانس نوسان ثابت نیست. شکل (۹) عملکرد روش پیشنهادی را در قبال نوسان توان Multi-mode ایجاد شده، نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، نرم بدست آمده از نوسان توان Multi-mode شرط بیان شده در رابطه (۶) را برهم نمی‌زند و به این ترتیب روش بیان شده نوسان توان Multi-mode را بدرستی تشخیص می‌دهد.



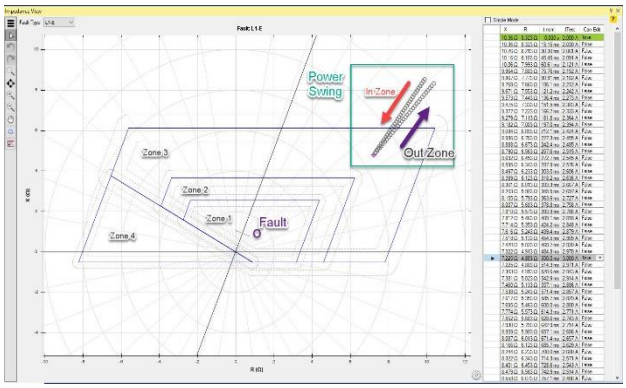
شکل (۹): الف) شکل موج دیده شده توسط رله دیستانس ب) مقدار تغییرات نرم در هر سه فاز ج) عملکرد رله دیستانس در زمان نوسان توان Multi-mode

۳-۲- تست عملی روش ارائه شده

به منظور تست عملی روش پیشنهادی، این روش با استفاده از رله دیستانس و تستر ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر، پیاده‌سازی می‌شود. مشخصات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رله و تستر مورد استفاده در [۴۲] ارائه شده است. شکل (۱۰) 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 (۱۱) نشان داده شده است [۴۳]. 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 که شکل موج نوسان توان ایجاد شده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با ورود نوسان توان به زون سوم رله دیستانس، الگوریتم بیان شده شروع به کار کرده و چون شرط بیان شده در رابطه (۶) بر هم نمی‌خورد نوسان توان تشخیص داده می‌شود. برای تشخیص خطای همزمان با نوسان توان، یک خطا در زون اول رله قرار داده شده است. همانطور که از جداول (۱) و (۲) مشخص است، الگوریتم بیان شده قابلیت تشخیص انواع خطا همزمان با نوسان توان را نیز بخوبی دارا می‌باشد.



شکل (۱۰): بستر ایجاد شده برای تست فانکشن نوسان توان پیشنهادی



شکل (۱۱): نحوه تست فانکشن نوسان توان

شکل (۱۲) عملکرد روش بیان شده را حین نوسان توان نشان می‌دهد. خطاهای مختلف توسط دستگاه تست رله به برد CT و PT رله تزریق شده و سیگنال‌های آنالوگ جریان توسط قطعه A/D به سیگنال‌های دیجیتال قابل استفاده توسط میکروپروسسور تبدیل می‌شوند. در ادامه از سیگنال‌های نمونه‌برداری شده توسط A/D مانند آنچه در بخش قبل بیان شد، استفاده شده است تا بین نوسان توان و خطا تفاوت گذاشته شود. همانطور که از شکل (۱۲) مشخص است بعد از گذشت ۳۰ میلی ثانیه از اعمال نوسان توان به رله دیستانس، الگوریتم پیشنهادی رله را بلاک کرده و از عملکرد بی مورد آن جلوگیری کرده است. در ادامه در ثانیه ۱، یک خطای دوفاز به رله اعمال شده است و الگوریتم بعد از گذشت حدود ۳۰ میلی ثانیه خطارا تشخیص داده و فرمان قطع بریکر را صادر می‌کند.

جدول‌های (۱) و (۲) نتایج مقایسه روش پیشنهادی در مقاله حاضر با روش متداول تشخیص خطا در صنعت که در مطالعات [۳۴-۳۶] پیشنهاد شده است را ارائه می‌دهند. این مقایسه با استفاده از تست عملی و در سناریوهای متفاوت از قبیل نوسان توان، خطای تکفاز همزمان با نوسان توان، خطای تکفاز امپدانس بالای همزمان با نوسان توان، خطای سه فاز همزمان با نوسان توان و خطای سه فاز امپدانس بالا همزمان با نوسان توان انجام شده است. هر دو روش در شرایط یکسان و با یک نوع رله تست شده‌اند. همچنین خطاهای متفاوت تزریقی توسط دستگاه تست رله به هردو روش نیز یکسان بوده تا بتوان نتایج را بطور دقیق مقایسه کرد.

همانگونه که از جدول‌های (۱) و (۲) 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 ۳۰ میلی ثانیه 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.

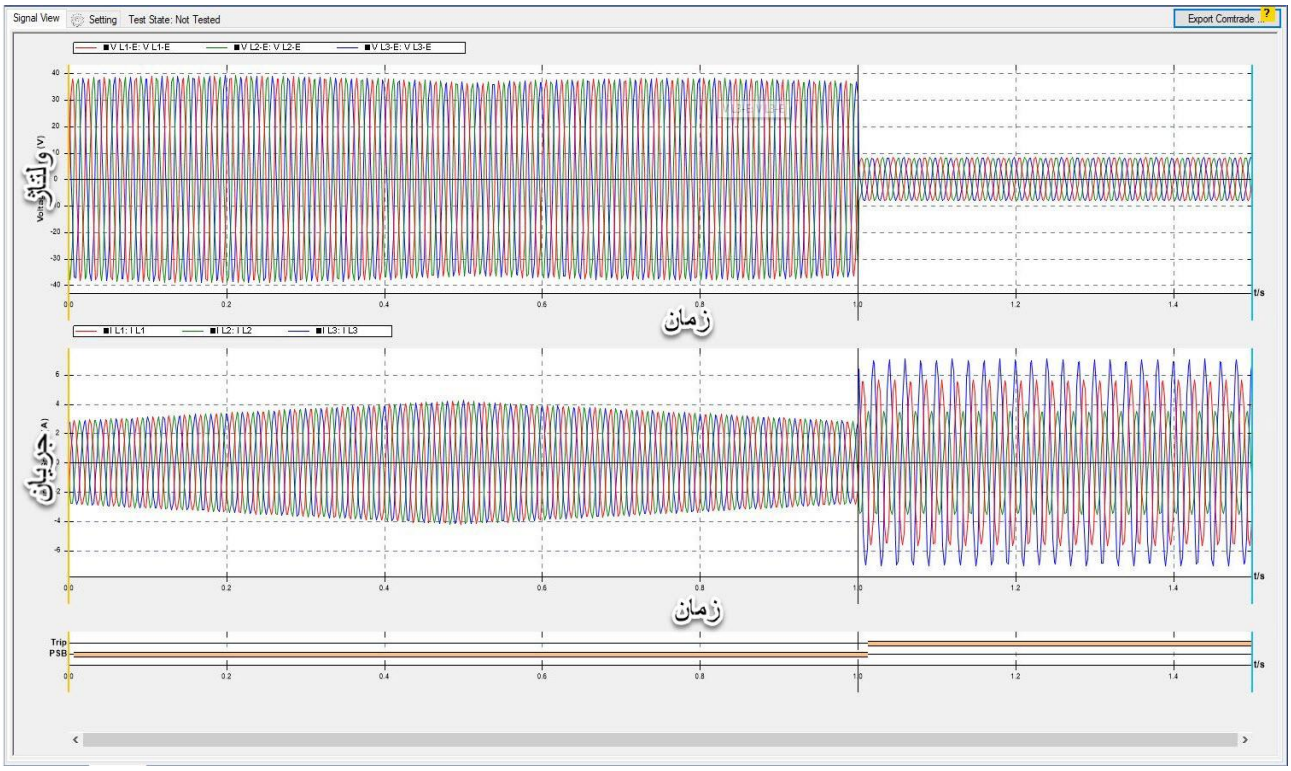
جدول (۱): نتایج تست در روش معمول صنعتی ارائه شده در [۳۴-۳۶]

زمان تشخیص خطای همزمان با نوسان توان	زمان تشخیص نوسان توان	خطای همزمان با نوسان توان تشخیص داده شده؟	نوسان توان تشخیص داده شده ؟	نوع تست
-	۱۰۳/۸	-	بله	نوسان توان
۱۰۱/۷	۱۰۴/۴	بله	بله	خطای تکفاز همزمان با نوسان توان
۹۴	۱۰۴/۱	بله	بله	خطای تکفاز امپدانس بالا همزمان با نوسان توان
۱۲۶/۶	۱۰۷	بله	بله	خطای سه فاز همزمان با نوسان توان
۱۲۰	۱۰۴/۱	بله	بله	خطای سه فاز امپدانس بالا همزمان با نوسان توان

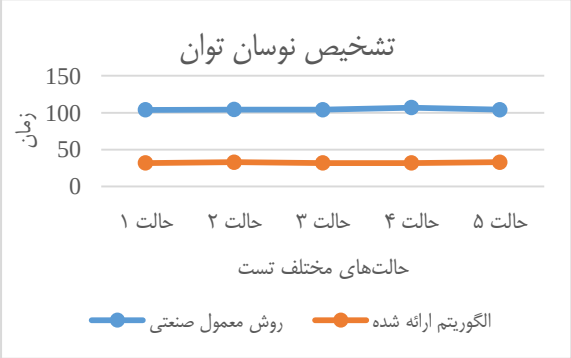
جدول (۲): نتایج تست روش بیان شده

زمان تشخیص خطای همزمان با نوسان توان	زمان تشخیص نوسان توان	خطای همزمان با نوسان توان تشخیص داده شده؟	نوسان توان تشخیص داده شده ؟	نوع تست
-	۳۲	-	بله	نوسان توان
۳۲	۳۳	بله	بله	خطای تکفاز همزمان با نوسان توان
۳۳	۳۲	بله	بله	خطای تکفاز امپدانس بالا همزمان با نوسان توان
۳۳	۳۲	بله	بله	خطای سه فاز همزمان با نوسان توان
۳۳	۳۳	بله	بله	خطای سه فاز امپدانس بالا همزمان با نوسان توان

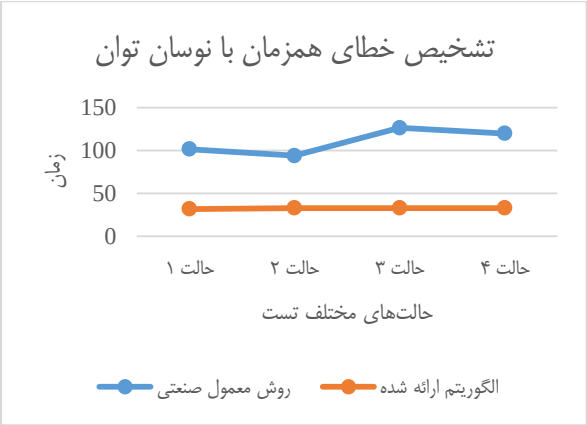
نمودارهای عملکرد روش معمول صنعتی و روش پیشنهادی در این مقاله در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. این شکل‌ها مقایسه بین روش معمول صنعتی و روش ارائه شده در این مقاله را در حالت‌های مختلف تست که در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است، نشان می‌دهند. همانگونه که از شکل (۱۳) مشخص است، روش معمول صنعتی در تشخیص نوسان توان در ۵ بار تست، زمانی حدود ۱۰۰ میلی ثانیه را ثبت کرده است. این در صورتی است که روش پیشنهادی در مقاله حاضر در همه ۵ بار تست حدود ۳۰ میلی ثانیه زمان نیاز داشته تا نوسان توان را تشخیص دهد. این مسئله برای خطاهای همزمان با نوسان توان نیز صادق است. از سوی دیگر، همانطور که از شکل (۱۴) مشخص است، روش معمول صنعتی در برابر خطاهای مختلف همزمان با نوسان توان (بیان شده در جدول‌های (۱) و (۲)) عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد. این در صورتی است که روش بیان شده تمامی خطاهای همزمان با نوسان توان را در ۳۰ میلی ثانیه تشخیص داده است.



شکل (۱۲): عملکرد فانکشن نوسان توان در تست عملی



شکل (۱۳): مقایسه روش معمول صنعتی و روش بیان شده در تشخیص نوسان توان



شکل (۱۴): مقایسه روش معمول صنعتی و روش بیان شده درتشخیص خطای همزمان با نوسان توان

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید بدون نیاز به استفاده از تبدیل فوریه با نرم‌گیری مستقیم از داده‌های نمونه‌برداری شده از سیگنال جریان بیان شده است. بر این اساس یک پنجره سیگنال تشکیل شده و از سیگنال جریان نمونه‌برداری می‌کند. در ادامه داده‌های موجود درون پنجره تشکیل یک ماتریس را خواهند داد که به راحتی می‌توان مقدار نرم آن‌ها را محاسبه کرد.از جمله ویژگی‌های روش بیان شده می‌توان به عدم نیاز به روش‌های پردازش سیگنال، سرعت بالا در تشخیص نوسان توان، تشخیص خطای همزمان با نوسان توان و کاهش محاسبات به منظور سهولت در پیاده‌سازی عملی اشاره کرد. بمنظور اثبات کارآیی روش پیشنهادی، این روش هم بر روی یک شبکه نمونه شبیه‌سازی گردید و هم توسط رله دیستانس و تستر ساخته شده در آزمایشگاه حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو، تست عملی گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش جدید بیان شده در این مقاله نسبت به روش معمول صنعتیکه در حال حاضر در رله‌های مختلف حفاظتی بویژه رله‌های ساخت شرکت زیمنس مورد استفاده قرار می‌گیرند، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین سرعت تشخیص نوسان توان و انواع خطای همزمان با نوسان توان در روش بیان شده نسبت به روش‌های معمول صنعتی، کاهش یافته است. براین‌اساس نتایج تست عملی نشان می‌دهند که روش معمول صنعتی، نوسان توان را در حدود ۱۰۰ میلی ثانیه تشخیص می‌دهد این در صورتی است که روش بیان شده در این مقاله نوسان توان را در حدود

۳۰ میلی ثانیه تشخیص می‌دهد. همچنین روش معمول صنعتی در خطای همزمان با نوسان توان عملکرد بسیار متفاوتی از خودنشان می‌دهد. این در حالی است که روش بیان شده عملکرد یکسانی نسبت به خطاهای متفاوت دارد.

مراجع

[1] S. Zubić, P. Balcerek, and Č. Zeljković, "Speed and security improvements of distance protection based on Discrete Wavelet and Hilbert transform," Electric Power Systems Research, vol. 148, pp. 27-34, 2017.

[2] H. Askarian, H. Sharifian, R. Mohammadi Chabanloo, and F. Razavi, "A new method for determination of minimum break points using genetic algorithm," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 8, no. 2, pp. 45-58, 2011.

[3] H. Asadi, M. Sanayepasand, and M. Davarpanah, "Introducing a Novel Method for Real Time Estimation of Power System Voltage Instability Based onWideArea Protection," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 4, no. 2, pp. 3-13, 2007.

[4] 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," in Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for, 2012, pp. 108-119: IEEE.

[5] A. H. A. Bakar, F. M. Yatim, S. Yusof, and M. R. Othman, "Analysis of overload conditions in distance relay under severe system contingencies," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 5, pp. 345-350, 2010.

[6] C. Li, Y. Sun, and X. Chen, "Analysis of the blackout in Europe on November 4, 2006," in Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International, 2007, pp. 939-944: IEEE.

[7] S. Corsi and C. Sabelli, "General blackout in italy sunday september 28, 2003, h. 03: 28: 00," in Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 2004, pp. 1691-1702: IEEE.

[8] P. Pentayya, A. Gartia, S. K. Saha, R. Anumasula, and C. Kumar, "Synchrophasor based application development in Western India," in Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2013 IEEE, 2013, pp. 1-6: IEEE.

[9] M. Gunasegaran, C. Tan, A. Bakar, H. Mokhlis, and H. Illias, "Progress on power swing blocking schemes and the impact of renewable energy on power swing characteristics: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 280-288, 2015.

[10] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand, and P. Jafarian, "Improvement of distance relay zone-3 security using fault and breaker opening generated traveling waves," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 27, no. 10, p. e2414, 2017.

[11] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, Power system stability and control. McGraw-hill New York, 1994.

[12] Z.Gao and G. Wang, "A new power swing block in distance protection based on a microcomputer-principle and performance analysis," in Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. APSCOM-91., 1991 International Conference on, 1991, pp. 843-847: IET.

[13] H. Khoradshadi-Zadeh, "Evaluation and performance comparison of power swing detection algorithms," in Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005, pp. 1842-1848: IEEE.

[14] X. Lin, Z. Li, S. Ke, and Y. Gao, "Theoretical fundamentals and implementation of novel self-adaptive distance protection resistant to power swings," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1372-1383, 2010.

[15] L. Martuscello, E. Krizauskas, J. Holbach, and Y. Lu, "Tests of distance relay performance on stable and unstable power swings reported using simulated data of the August 14 th 2003 system disturbance," in Power Systems Conference, 2009. PSC'09., 2009, pp. 1-21: IEEE.

[16] B. Mahamedi, "A very fast unblocking scheme for distance protection to detect symmetrical faults during power swings," in IPEC, 2010 Conference Proceedings, 2010, pp. 378-383: IEEE.

[17] P. K. Nayak, J. G. Rao, P. Kundu, A. Pradhan, and P. Bajpai, "A comparative assessment of power swing detection techniques," in Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on, 2010, pp. 1-4: IEEE.

[18] G. Benmouyal, D. Hou, and D. Tziouvaras, "Zero-setting power-swing blocking protection," in 31st Annual Western Protective Relay Conference, 2004, pp. 19-21.

[19] H. K. Karegar and B. Mohamedi, "A new method for fault detection during power swing in distance protection," in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on, 2009, vol. 1, pp. 230-233: IEEE.

[20] B. Mahamedi and J. G. Zhu, "A novel approach to detect symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1368-1376, 2012.

[21] Y. F. Li and K. F. Chen, "Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform," Computer Physics Communications, vol. 178, no. 7, pp. 486-491, 2008.

[22] H. Ahmad, M. Salam, L. Y. Ying, and N. Bashir, "Harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study the aging of insulators," Journal of Electrostatics, vol. 66, no. 3-4, pp. 156-164, 2008.

[23] S. Brahma, "Use of wavelets for out of step blocking function of distance relays," in Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006, p. 5 pp.: IEEE.

[24] 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.

[25] B. Mahamedi, "A new power swing blocking function based on wavelet transform," in Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on, 2011, pp. 1-6: IEEE.

[26] R. Dubey, S. Samantaray, A. Tripathy, B. C. Babu, and M. Ehtesham, "Wavelet based energy function for symmetrical fault detection during power swing," in Engineering and Systems (SCES), 2012 Students Conference on, 2012, pp. 1-6: IEEE.

[27] S. Lotfifard, J. Faiz, and M. Kezunovic, "Detection of symmetrical faults by distance relays during power

زیرنویس‌ها

[1] Swing Center Voltage (SCV)
[2] Fast Fourier Transform (FFT)
[3] Spectral leakage
[4] Picket fence
[5] Wavelet Transform (WT)
[6] Support Vector Machine (SVM)
[7] ANFIS
[8] RMS

swings," IEEE transactions on power delivery, vol. 25, no. 1, pp. 81-87, 2010.

[28] K. Seethalekshmi, S. Singh, and S. Srivastava, "A classification approach using support vector machines to prevent distance relay maloperation under power swing and voltage instability," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1124-1133, 2012.

[29] 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.

[30] A. K. Rao and A. Ahmad, "Power swing blocking (PSB) function for distance relay using prediction technique," International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 8, no. 2, pp. 301-307, 2017.

[31] A. K. Rao, K. Soni, S. Sinha, and I. Nasiruddin, "Tracking of impedance trajectory for distance protection using neural networks," in Electrical, Computer and Electronics (UPCON), 2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on, 2017, pp. 289-294: IEEE.

[32] J. G. Rao and A. K. Pradhan, "Power-swing detection using moving window averaging of current signals," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 368-376, 2015.

[33] 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.

[34] S. SIPROTEC, "Distance Protection 7SA522 V4. 70," instruction manual, 2011.

[35] J. Blumschein, Y. Yelgin, and M. Kereit, "Proper detection and treatment of power swing to reduce the risk of Blackouts," in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, 2008, pp. 2440-2446: IEEE.

[36] G. Ziegler, Numerical distance protection: principles and applications. John Wiley & Sons, 2011.

[37] T. Saha, "Test system report," Power and Energy Research Group, 2011.

[38] É. M. Lima, C. M. dos Santos Junqueira, N. S. D. Brito, B. A. de Souza, R. de Almeida Coelho, and H. G. M. S. de Medeiros, "High impedance fault detection method based on the short-time Fourier transform," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 11, pp. 2577-2584, 2018.

[39] H. Laaksonen and P. Hovila, "Method for high-impedance fault detection," CIRED-Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 1295-1299, 2017.

[40] T. Lai, L. Snider, and E. Lo, "Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults," Electric power systems research, vol. 76, no. 8, pp. 626-633, 2006.

[41] T. Cui, X. Dong, Z. Bo, A. Klimek, and A. Edwards, "Modeling study for high impedance fault detection in MV distribution system," in Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International, 2008, pp. 1-5: IEEE.

[۴۲] شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر .ارائه شده در :http://vebko.ir/

[43] Q. Verzosa, "Realistic testing of power swing blocking and out-of-step tripping functions," in Protective Relay Engineers, 2013 66th Annual Conference for, 2013, pp. 420-449: IEEE.