

# طراحی و ساخت رله خطای امیدانس بالا بر اساس تحلیل هارمونیکی برای شبکه توزیع ۳۳ کیلوولت شهرستان اهواز

مهدی منادی، سید قدرت‌اله سیف‌السادات، رضا کیانی‌نژاد و محمد بهاری‌پور

برخورد سیم‌ها با درخت از جمله اتفاقاتی است که باعث خسارتی شده است. از آنجا که ماهیت رفتار کمیت‌های سیستم در این قبیل خطاها در بسیاری از موارد با ماهیت پارامترهای اندازه‌گیری شده در حفاظت‌های متداول متفاوت است، لذا توجه به روش‌های جدید جهت ایمن کردن شبکه در مقابل این نوع اشکالات از اهمیت بالایی برخوردار است. خطاهای عمده در سیستم‌های توزیع را می‌توان به دو دسته اساسی خطاهای با امیدانس پایین (LIF) و خطاهای با امیدانس بالا (HIF) تقسیم نمود. در این تقسیم‌بندی، خطاهای LIF به راحتی و با روش‌های مشخصی توسط رله‌های حفاظتی متداول (از قبیل رله‌های اضافه جریان، اتصال زمین، فیوزها و ...) قابل تشخیص هستند. در حالی که خطاهای امیدانس بالا به راحتی توسط این تجهیزات قابل شناسایی نیستند [۱]. این واقعیت به این دلیل است که جریان عبوری از شبکه پس از وقوع یک خطای امیدانس بالا معمولاً در نواحی حفاظتی سیستم‌های متداول قرار ندارد [۲] و [۳]. مثلاً در مورد رله‌های اضافه جریان، جریان‌های کمتر از جریان نامی خط جزء ناحیه حفاظتی آن نمی‌باشد و رله برای این قبیل جریان‌ها عملکردی نخواهد داشت. در نتیجه این رله نمی‌تواند خطاهای امیدانس بالا را تشخیص دهد.

با توجه به این که پس از وقوع خطای امیدانس بالا، قدر مطلق اندازه جریان و ولتاژ تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت، لازم است پارامترهای دیگری برای تشخیص خطا ارائه گردد. بر این اساس در مقاله‌های متفاوت، روش‌هایی مبتنی بر استفاده از پارامترهای مختلفی، غیر از مقدار مؤثر جریان ارائه شده است [۴] و [۵]. هرچند برای یافتن پارامترهای مهم در تشخیص خطاهای امیدانس بالا، تحلیل‌های گوناگونی در حوزه زمان و فرکانس ارائه شده است ولی با توجه به ماهیت این قبیل خطاها، تحلیل‌های حوزه زمان به تنهایی نمی‌توانند کارایی مناسبی داشته باشند [۶]. لذا در بسیاری از مقالات از مؤلفه‌های هارمونیکی جریان یا هر دو مؤلفه جریان و ولتاژ استفاده شده است. خصوصاً استفاده از هارمونیکی‌های جریان می‌تواند به خوبی برای ایجاد تمایز بین خطاهای امیدانس بالا و جریان نرمال خط مورد استفاده قرار گیرند [۷] و [۸]. قابل ذکر است که استفاده از ولتاژ در تشخیص خطای امیدانس بالا صرفاً زمانی میسر و عملی است که تغییرات یا افت ولتاژ کافی در اثر وقوع این خطا ایجاد شده باشد [۹]. در [۱۰] از ولتاژ و جریان محدوده فرکانسی مشخصی برای تشخیص HIF استفاده شده که در آن هارمونیکی‌های اول تا ۹۶م (معادل ۴۸۰۰ هرتز) موجود می‌باشد. این هارمونیکی‌ها در دسته‌بندی‌های به صورت ۶ نوع داده ورودی ارائه می‌گردند. در [۱۱] صرفاً از مؤلفه‌های جریان برای تشخیص HIF استفاده گردیده و در آن نشان داده شده که برای تشخیص این نوع خطا، این پارامترها از اهمیت بالایی برخوردار هستند: مقدار مؤثر (rms) جریان، نسبت اندازه هارمونیکی دوم به مقدار

چکیده: وقوع خطاهای امیدانس بالا (HIF) در شبکه‌های توزیع برق، خطرات جانی و مالی عمده‌ای را می‌تواند به همراه داشته باشد. از سوی دیگر، تشخیص این قبیل خطاها معمولاً توسط رله‌های اضافه جریان که معمولاً در سیستم‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند، قابل انجام نیست و لازم است الگوریتم‌های خاصی برای آن طراحی و پیشنهاد گردد. در این مقاله، ابتدا ماهیت این خطاها و روش‌های شبیه‌سازی آنها مورد بررسی قرار گرفته و سپس با بررسی روش‌های قابل استفاده جهت تشخیص آنها، روشی مبتنی بر تحلیل‌های هارمونیکی ارائه شده است. در این روش، رله پیشنهادی پس از وقوع خطا، هارمونیکی‌های مورد نیاز را استخراج نموده و با الگوریتمی که از قبل برای آن برنامه‌ریزی شده است، وقوع خطا را تشخیص می‌دهد. در این مقاله، نحوه ساخت رله پیشنهادی و بخش‌های مختلف سخت‌افزار آن توضیح داده شده است. همچنین نرم‌افزار این رله برای حالت‌های گوناگون وقوع خطاهای امیدانس بالا تحت آزمایش قرار گرفته و سخت‌افزار مربوط به آن نیز در آزمون آزمایشگاهی در تشخیص این خطاها موفق بوده است. با توجه به این که سخت‌افزار مورد استفاده در این رله می‌تواند با تغییرات اندکی برای سایر رله‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد، جزئیات مربوط به طراحی سخت‌افزار هم در این مقاله بیان شده است.

کلیدواژه: تحلیل هارمونیکی، حفاظت خطای امیدانس بالا، سیستم توزیع.

## ۱- مقدمه

حجم عمده‌ای از شبکه توزیع برق اهواز از خطوط توزیع هوایی با سطح ولتاژ ۱۱ یا ۳۳ کیلوولت در داخل شهر و خصوصاً مناطق روستایی در اطراف شهر تشکیل گردیده است. لزوم برق‌رسانی پیوسته و مطمئن به همه مشترکین، ما را به این نکته رهنمون می‌سازد که ضرورت دارد علاوه بر بالابردن قابلیت اعتماد سیستم توزیع، سطح ایمنی آن را نیز افزایش دهیم و با نصب تجهیزات حفاظتی، علاوه بر حفظ تجهیزات شبکه، ایمنی مشترکان را هم در برابر انواع خطرات قابل پیش‌بینی محافظت نماییم. وقوع اتفاقاتی از قبیل افتادن سیم‌ها بر روی زمین‌های با مقاومت بالا یا

این مقاله در تاریخ ۲۹ تیر ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۶ تیر ماه ۱۴۰۰ بازنگاری شد. این تحقیق توسط شرکت توزیع نیروی برق اهواز پشتیبانی شده است.  
مهدی منادی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، (email: m.monadi@scu.ac.ir).  
سید قدرت‌اله سیف‌السادات، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، (email: gh.seifossadat@scu.ac.ir).  
رضا کیانی‌نژاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، (email: reza.kiani@scu.ac.ir).  
محمد بهاری‌پور، شرکت فولاد خوزستان، اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، (email: m.baharipoor@gmail.com).

## Archive of SID

در این مقاله با توجه به اهمیت فاکتورهای فرکانسی و هارمونیک‌ها در تشخیص خطای امپدانس بالا، اولاً هارمونیک‌هایی که وجود و مقدار آنها معرف خطای امپدانس بالاست تعیین می‌شوند و ثانیاً الگوریتم یا روش کنترلی مناسبی برای شناسایی خطا بر اساس این هارمونیک‌ها معرفی می‌گردد. بر این اساس با شبیه‌سازی دقیق سیستم قدرت، مقادیر مؤلفه‌های ولتاژ و جریان شبکه استخراج می‌گردد تا بتوان الگوریتمی جهت شناسایی خطای امپدانس بالا ارائه نمود.

### ۲- خطاهای امپدانس بالا

طبق تعریف، خطاهای امپدانس بالا، خطاهایی هستند که به دلیل مقاومت بالایشان، باعث ایجاد جریان کافی برای تحریک رله‌های اضافه جریان نمی‌شوند و معمولاً در حوزه توزیع و فوق توزیع، یا به عبارتی سطح ولتاژ فشارمتوسط، اتفاق می‌افتند [۸] و [۲۵]. خطاهای امپدانس بالا در سیستم‌های توزیع به عنوان یکی از مشکلات اساسی و بزرگ شرکت‌های توزیع برق هستند. این خطاها معمولاً زمانی اتفاق می‌افتند که یک سیم لخت از طریق یک جسم با امپدانس زیاد (از قبیل شاخه‌های درختان) با زمین ارتباط پیدا کند یا از طریق قله‌سنگ‌های بزرگ یا آسفالت بر روی زمین بیفتد. معمولاً یک سیم که انتهای آن بریده شده باشد یک خطای امپدانس بالا ایجاد می‌کند. هادی‌ها و کابل‌های فیدرهای توزیع به دلیل قرارگرفتن در مناطق معمولاً با تمرکز جمعیت بالا و در نتیجه نزدیک‌بودن به اجسامی از قبیل درختان یا دیوارهای بلند، بیشتر از خطوط انتقال در معرض وقوع خطا می‌باشند. برخورد و تماس اجسام خارجی با فیدرهای توزیع باعث می‌شود که پتانسیل الکتریکی از طریق تماس اجسام مختلف با این فیدرها به عنوان یک تهدیدکننده زندگی افرادی که در نزدیکی محل تماس قرار دارند مطرح باشد و در صورت عدم تشخیص و تصحیح به موقع می‌تواند باعث برق‌گرفتگی و مرگ افراد گردند [۸]. همچنین اثرات دیگری همچون آتش‌سوزی‌های ناشی از تماس اشیای مستعد سوختن با این پتانسیل الکتریکی به عنوان یک تهدید بالقوه مطرح است. از سوی دیگر وقوع این قبیل خطاها می‌تواند به عنوان یک عامل مهم در تلف‌شدن انرژی الکتریکی مطرح باشد که در این حالت شرکت‌های برق متحمل ضررهای اقتصادی می‌گردند که بدیهی است در صورتی که این خطاها به سرعت رفع نگردد، میزان این ضرر قابل توجه باشد. شکل ۱، نمونه‌ای از یک شبکه مستعد ایجاد خطای امپدانس بالا و نیز وقوع آتش ناشی از افتادن شاخه درخت بر روی خط برق‌دار و در نتیجه ایجاد خطای امپدانس بالا و عدم تشخیص خطا توسط رله‌های اضافه‌جریان را نشان می‌دهد [۲۶] و [۲۷].

در رله‌گذاری‌های متداول معمولاً فقط شرایط اتصال کوتاه مورد بررسی و حفاظت قرار می‌گیرند که این باعث می‌شود حجم عمده‌ای از انرژی الکتریکی قبل از آن که به مصرف‌کننده‌ها برسد در زمان محدودی تلف گردد. همچنین در این حالت به دلیل عبور جریان‌های زیاد از بخش‌های مختلف سیستم و آسیبی که می‌تواند به این تجهیزات وارد نماید، در واقع یک حالت بحرانی برای سیستم به وقوع می‌پیوندد، لذا به دلیل حساسیت این قبیل خطاها، روش‌ها و تجهیزات حفاظتی مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. اما نوع خطایی که مورد بحث قرار خواهد گرفت، خطایی است که توسط رله‌ها و سیستم‌های حفاظتی متداول قابل تشخیص نیست. در این قبیل خطاها، جریان‌های کوچکی که می‌توان از آنها به عنوان نشانی نام برد، از طریق اجسام خارجی از فیدر به زمین منتقل می‌شوند. در واقع در این حالت یک امپدانس قابل توجه بین خطوط و زمین قرار گرفته و جریان با عبور از این امپدانس به زمین منتقل می‌گردد. به عبارت دیگر

rms جریان، نسبت اندازه هارمونیک سوم به مقدار rms جریان، نسبت اندازه هارمونیک پنجم به مقدار rms جریان و مقدار فاز هارمونیک سوم جریان. همچنین در [۱۲] از نسبت هارمونیک‌های دوم و سوم جریان به عنوان مشخصه تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده است. قابل ذکر است، همان گونه که از نمونه‌های بیان شده در بالا برمی‌آید، در بسیاری از مقالات صرفاً بر روی هارمونیک‌های مرتبه پایین تمرکز شده و در این میان، در بسیاری از مقالات، هارمونیک سوم جریان نقش مهمی در تشخیص خطای امپدانس بالا دارد [۶] و [۱۳]. روش مورد استفاده در [۱۴] به این صورت است که از ولتاژ باقیمانده برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده می‌شود. در این مرجع به جای استفاده از مؤلفه‌های هارمونیک، به دلیل آن که ماهیت خطای امپدانس بالا با نامتعادلی در سیستم همراه است، لذا استفاده از ولتاژ باقیمانده پیشنهاد شده که می‌تواند حتی خطاهای با مقاومت بزرگ را هم تشخیص دهد.

با توجه به اهمیت نقش هارمونیک‌ها در تشخیص خطاهای امپدانس بالا، لازم است استفاده از روش‌های استخراج این هارمونیک نیز مورد توجه قرار گیرد. در بسیاری از مقاله‌ها از سری فوریه یا تبدیل فوریه سریع برای تحلیل هارمونیک و به دست آوردن هارمونیک‌ها از داده‌های دیجیتالی ولتاژ و جریان استفاده شده است. به عنوان مثال در [۱۱] یک طرح حفاظتی بر مبنای تبدیل فوریه سریع<sup>۱</sup> (FFT) برای شناسایی HIF در فیدرهای شعاعی ارائه شده است. در [۳] از تبدیل فوریه گسسته برای محاسبه و تحلیل مؤلفه‌های شکل موج جریان استفاده گردیده است. همچنین در [۱۵] از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) برای استخراج مؤلفه‌های هارمونیک مورد نیاز در این مقاله (یعنی هارمونیک‌های دوم، سوم و پنجم) استفاده شده است.

برای تحلیل الگوهای رفتاری هارمونیک‌های جریان و ولتاژ پس از وقوع خطای امپدانس بالا، استفاده از روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است. مثلاً در [۱۶] و [۱۷] استفاده از تبدیل ویولت پیشنهاد گردیده است. به عنوان نمونه‌هایی دیگر، در [۱۸] و [۱۹] از شبکه‌های عصبی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا استفاده شده است. همچنین در [۲۰] از سیستم فازی-عصبی (ANFIS) برای تحلیل‌های مورد نیاز برای تشخیص خطا استفاده شده است. روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در [۲۱] نیز از شبکه‌های عصبی و تبدیل موجک استفاده می‌کند. این روش‌ها نیازمند پروسه آموزش دقیق شبکه عصبی هستند که ممکن است همواره امکان‌پذیر نباشد و در صورت آموزش ناقص و یا در نظر نگرفتن برخی از حالاتی که ممکن است در شبکه رخ دهد، امکان عملکرد اشتباه وجود دارد. ضمن آن که استفاده از تبدیل ویولت [۷] و شبکه‌های عصبی، حجم محاسبات مورد نیاز برای تشخیص خطا را بالاتر خواهد برد.

استفاده از برخی از امکانات موجود در شبکه‌های هوشمند نیز در تشخیص خطای امپدانس بالا مورد توجه بوده است. به عنوان مثال، در [۲۲] از داده‌های منتقل شده توسط PLC<sup>۲</sup> برای تشخیص مکان این خطاها استفاده شده است. در [۲۳] و [۲۴] نیز استفاده از PMU و فازورهای سنکرون برای بهبود تشخیص خطای امپدانس بالا پیشنهاد شده است. با وجود عملکرد مناسب این روش‌ها، به دلیل نیاز آنها به لینک‌های مخابراتی و تجهیزات واسط انتقال داده، استفاده آنها در بسیاری از شبکه‌های توزیع که فاقد این امکانات هستند امکان‌پذیر نمی‌باشد.

1. Fast Fourier Transform
2. Power Line Carrier

## Archive of SID

### ۳- شبیه‌سازی خطا و سیستم قدرت

#### ۳-۱ مدل‌سازی خطای امیدانس بالا

به دست آوردن روش مشخصی که با استفاده از آن بتوان با درجه بالایی از امنیت و دقت، همه انواع خطاهای امیدانس بالا را در همه حالات شبکه توزیع از قبیل تغییرات در میزان بار یا کلیدزنی خازن‌ها و غیره تشخیص داد و آنها را با شرایط کاری دیگر اشتباه نگرفت، کار دقیقی است. این به دلیل ماهیت غیر خطی خطاهای امیدانس بالا است که آنها را به گونه‌ای مشابه پدیده‌هایی مثل کلیدزنی خازن‌ها، راه‌اندازی بارهای بزرگ یا ورود ادوات الکترونیک قدرت می‌کند [۲۹] تا [۳۱].

این کار نیاز به شبیه‌سازی دقیق سیستم قدرت و خصوصاً یافتن مدل مناسبی برای خطای امیدانس بالا دارد که در این بخش به معرفی روند شبیه‌سازی می‌پردازیم.

در [۳۲] تلاش شده که رفتار خطاهای امیدانس بالا با انجام تست‌های عملی بر روی فیدرهای توزیع مورد بررسی قرار گیرد. با وجود این، علاوه بر شناسایی رفتار ولتاژ و جریان سیستم پس از وقوع خطاهای امیدانس بالا، لازم است یک مدل ریاضی نیز برای این خطا ارائه گردد که رفتاری نزدیک به رفتار خطا را ارائه دهد. مدل‌های مختلفی بر پایه تحلیل ریاضی رفتار خطا، برای خطاهای HIF ارائه شده است. مثلاً در مدل ارائه‌گردیده در [۳۳] که به مدل Hochrainer معروف است، با استفاده از تئوری سیستم‌های کنترل و نیز با استفاده از مفهوم تعادل انرژی در قوس پدیدآمده از HIF، رفتار دینامیکی میزان هدایت قوس توصیف شده است. در این روش، رفتار دینامیکی قوس با استفاده از معادله دیفرانسیل (۱) توصیف گردیده است

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g) \quad (1)$$

که در آن  $g$  هدایت لحظه‌ای قوس،  $G$  هدایت ثابت قوس و  $\tau$  ثابت زمانی است. در واقع  $G$  را می‌توان این گونه تفسیر نمود که بیان‌کننده میزان هدایت قوس در زمانی است که جریان قوس در مدت زمان نسبتاً زیادی ثابت نگه داشته شود. بر این اساس،  $G$  را می‌توان به صورت نشان داده شده در (۲) بیان نمود

$$G = \frac{|i|}{u_{st}} \quad (2)$$

که  $u_{st}$  در (۳) تعریف می‌شود

$$u_{st} = (u_r + r |i|) I_{arc} \quad (3)$$

در (۳)،  $u_{st}$  ولتاژ قوس در حالت ماندگار،  $u_r$  ثابت ولتاژ به ازای واحد طول قوس،  $r$  مؤلفه مقاومت قوس به ازای واحد طول قوس،  $i$  جریان قوس و  $I_{arc}$  طول قوس است که با زمان تغییر می‌کند. در واقع در این مدل، مقدار  $G$  و ثابت زمانی  $\tau$  مجهول‌های مسأله هستند.

روش‌های گوناگونی هم برای یافتن مقادیر مجهول روش Hochrainer ارائه شده‌اند. مثلاً در [۳۴] برای تخمین  $G$  و  $\tau$ ، بدین صورت عمل می‌شود که حل معادله دیفرانسیل (۱) با تعریف  $G$  و  $\tau$  به صورت بیان‌شده در (۴) آغاز می‌شود

$$G(t) = \frac{|i(t)|}{V_{arc}} \quad (4)$$

که در آن  $V_{arc}$  ولتاژ قوس است که فرض می‌شود در هر دو نیم‌سیکل مثبت و منفی ثابت است و بر اساس روش توضیح داده شده در [۱۹] قابل



(الف)



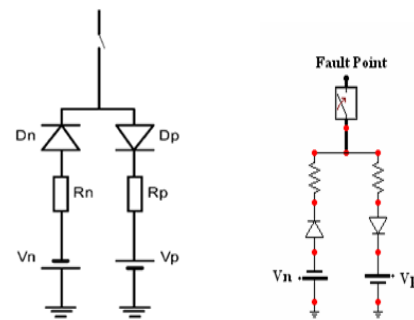
(ب)

شکل ۱: (الف) عبور سیم‌های توزیع از میان درختان و احتمال وقوع خطای HIF [۲۶] و (ب) آتش‌سوزی ناشی از افتادن شاخه درخت بر روی خط و وقوع خطای HIF [۲۷].

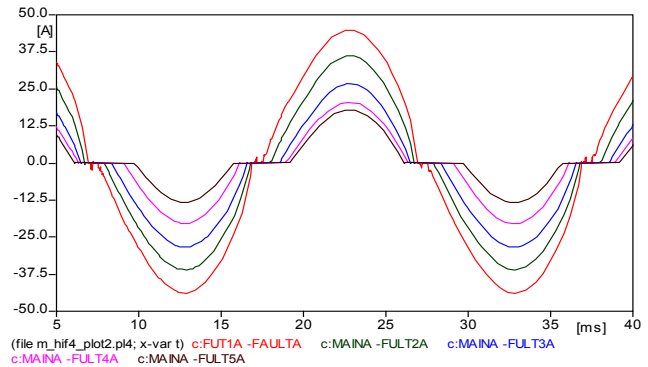
با توجه به این که اجسام خارجی مورد اشاره در شرایط عادی، هادی برق نیستند و فقط در صورتی که تحت ولتاژهای مشخصی قرار بگیرند اقدام به هدایت الکتریکی خواهند نمود، لذا از امیدانس بالایی برخوردار می‌باشند. به عنوان مثال این اتفاق می‌تواند در اثر برخورد شاخه‌های یک درخت بلند با خطوط یا در شرایط افتادن یکی از خطوط قطع شده بر روی زمین‌های با امیدانس بالا یا اتصال خطوط از طریق یک مانع به زمین روی دهد. با توجه به افزایش محدود جریان، لازم است تا با استفاده از الگوریتم‌های کارآمد و جدید در کمترین زمان ممکن ضمن تشخیص وقوع این قبیل خطاها، با دقت مناسبی به رفع آنها اقدام نمود. بر اساس گزارشی که توسط شرکت برق General Electric آمریکا داده شده است، حدود ۵ تا ۱۰ درصد از خطاهای اتفاق افتاده در سیستم‌های توزیع از نوع خطاهای امیدانس بالا هستند [۲۸]. بر اساس مطالعات انجام شده توسط شرکت برق پنسیلوانیای آمریکا در حدود ۳۲ درصد از این خطاها توسط سیستم‌های حفاظت اضافه جریان شناسایی نمی‌شوند [۱۳]. این اعداد نشان‌دهنده آن هستند که با توجه به خطرات جانی و مالی مترتب بر این نوع خطاها لازم است حتماً سیستم‌های حفاظتی خاصی برای این نوع خطاها در نظر گرفته شود.

جدول ۱: مقادیر عناصر مدل خطای امپدانس بالا برای حالات مختلف.

شماره حالت	عنوان در شکل ۲	$R_p$ (اهم)	$R_n$ (اهم)	$V_p$ (ولت)	$V_n$ (ولت)
۱	FUTA - FAULTA	۱۵۰	۹۶	۴۰۰۰	۳۵۰۰
۲	MAINA - FULT2A	۲۰۸	۱۲۱	۳۶۰۰	۳۸۵۰
۳	MAINA - FULT3A	۲۳۵	۲۵۰	۶۷۰۰	۶۱۰۰
۴	MAINA - FULT4A	۲۶۷	۲۵۵	۷۵۰۰	۸۰۰۰
۵	MAINA - FULT5A	۲۷۲	۲۹۰	۸۱۰۰	۹۳۵۰



الف) مدل HIF [V] و [I]



ب)

شکل ۲: الف) مدل خطای امپدانس بالا و شبیه‌سازی شده آن در EMTP و ب) جریان خطا به ازای مقادیر مختلف مقاومت و منبع DC.

محاسبه است. از سوی دیگر برای یافتن  $\tau$ ، معادله قوس به صورت گسسته و به شکل فرمول بیان شده در (۵) نوشته می‌شود

$$\frac{g(k+1) - g(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{|i(k)|}{V_{arc}} - g(k) \right), \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

رابطه بالا شامل مقدار مجهول  $\tau$  است. بر اساس نتایج به دست آمده و تست‌های عملی انجام شده بر روی رفتار HIF،  $\tau$  را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۳۳]

$$\tau = Ae^{Bg} \quad (6)$$

که در آن  $A$  و  $B$  مقادیر ثابتی هستند که از آزمایش‌های انجام شده بر روی قوس HIF حاصل می‌شود.

اگرچه روش‌هایی مثل مدل بیان شده در بالا می‌تواند رفتار قوس HIF را تحلیل نماید، اما می‌توان این قبیل روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های ریاضی را با روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های مداری جایگزین نمود. به عبارت دیگر بر اساس شناخت رفتار و ماهیت قوس HIF می‌توان با مجموعه‌ای از عناصر الکتریکی، مداری را تشکیل داد که رفتار HIF را شبیه‌سازی نماید. بر این اساس، لازم است ابتدا مشخصات رفتاری HIF استخراج و سپس یک مدل مداری برای آن ارائه شود. بر اساس مقاله‌ها و کارهای عملی انجام شده مشاهده می‌شود که معمولاً خطاهای امپدانس بالا دارای مشخصات منحصر به فرد زیر می‌باشند:

- اندازه جریان آنها کم بوده و به راحتی از جریان بار قابل تمایز نیستند [۳۵].
- ماهیتی غیر خطی دارد و در نتیجه جریان ناشی از آن از حالت سینوسی خارج می‌شود [۶].
- به دلیل غیر خطی بودن رفتار خطای امپدانس بالا، معمولاً هارمونیک‌های جریان تا فرکانس ۶۰۰ هرتز و هارمونیک‌های ولتاژ تا ۳۰۰ هرتز در آن دیده می‌شوند [۸].

- این خطاها با جرقه همراه بوده و در واقع با یونیزاسیون هوا همراه می‌باشند.

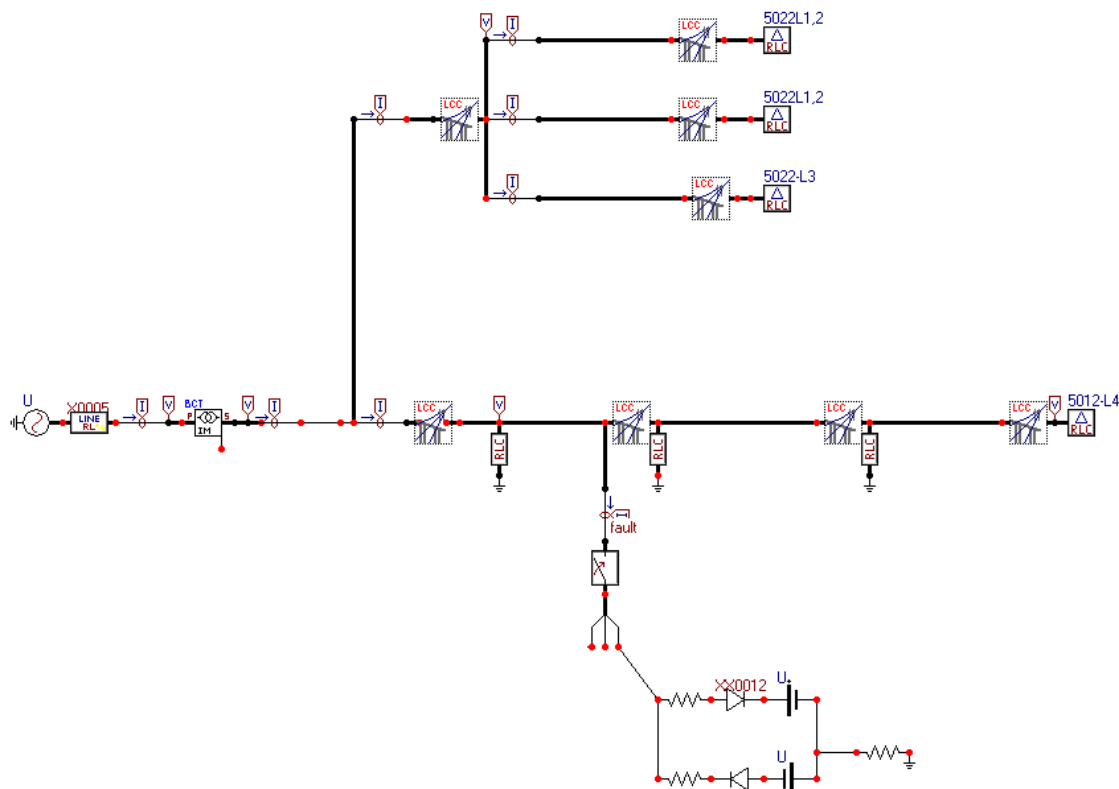
- پیک جریان در نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی لزوماً با هم برابر نمی‌باشد و در نتیجه شکل موج از حالت تقارن خارج می‌شود [۳۶].

- به دلیل این که این خطاها نوعاً به صورت تک‌فاز می‌باشند و خطاهای امپدانس بالای سه‌فاز بسیار کم گزارش شده است، ایجاد نامتعادلی در سیستم قدرت، یکی از مشخصات اصلی این نوع خطاهاست.

بر این اساس، در این مقاله جهت شبیه‌سازی خطای امپدانس بالا از مدل دو دیودی نشان داده شده در شکل ۲ استفاده می‌گردد. این مدل در مقالاتی همچون [۷] و [۲۵] مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این مدل به این دلیل است که پدیده‌های فرکانس پایینی که پس از وقوع این نوع خطا و جرقه‌های ناشی از آن اتفاق می‌افتد را بتوان شبیه‌سازی نمود. این مدل قابلیت نمایش حالت دینامیک مرتبط با انواع خطاهای امپدانس بالا را دارد. مدل‌های ریاضی دیگری نیز برای شبیه‌سازی خطای امپدانس بالا ارائه شده‌اند که عمدتاً با منطق مشابه با مدل مورد استفاده در این مقاله، طراحی و پیشنهاد شده‌اند [۸] و [۳۵].

کلید نشان داده شده در شکل ۲ در شرایط عملکرد عادی سیستم، باز است. در این مدل دو منبع DC که با  $V_p$  و  $V_n$  مشخص شده‌اند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو منبع بیانگر ولتاژهای مورد نیاز برای شروع یونیزاسیون در هوا و ایجاد و ادامه یافتن جرقه می‌باشند. مقاومت‌های  $R_n$  و  $R_p$  بیانگر مقاومت‌های خطا هستند و می‌توانند دارای مقادیر مساوی یا نامساوی باشند که نامساوی بودن آنها می‌تواند بیانگر حالات خطاهای نامتقارنی باشد که در آنها نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی ولتاژ، شرایط یکسان و برابری ندارند. از این مدل کاملاً قابل تشخیص است که زمانی که ولتاژ سیستم از حد ولتاژ  $V_p$  افزایش می‌یابد، دیود مربوط به این شاخه در حالت هدایت قرار گرفته و در نتیجه جریان خطا جاری خواهد شد. در نیم‌سیکل منفی نیز با افزایش ولتاژ منفی از مقدار  $V_n$ ، جریان خطا در جهت عکس حالت مثبت جاری خواهد شد. بدیهی است که بین ولتاژهای  $V_n$  و  $V_p$  جریان خطا جاری نخواهد شد.

این مدار در مجموع باعث ایجاد یک جریان غیر خطی می‌گردد که با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی برای این نوع خطا همخوانی دارد. مقدار مقاومت خطا در همه مراحل شبیه‌سازی به گونه‌ای تنظیم شده که میزان جریان عبوری از شین ۳۳ کیلوولت بیش از ۱۲۰٪ جریان نامی بار نگردد. مقدار مقاومت‌ها و منابع DC این مدل در جدول ۱ بیان شده‌اند. در جدول ۱، مقادیر مقاومت‌های  $R_p$  و  $R_n$  به گونه‌ای در نظر گرفته شده که در هر حالت، جریان‌هایی معادل جریان‌های بیان شده در مقاله‌ها و کارهای عملی برای خطای امپدانس بالا در محل‌های مختلف فراهم گردد. در شکل ۲ جریان‌های خطا در پنج حالت ذکر شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳: سیستم توزیع مطالعه شده و نحوه اعمال خطا در آن.

جدول ۲: مشخصات فیدرهای تحت مطالعه.

شماره فیدر	سطح ولتاژ (kV)	ترانس تغذیه کننده (MVA)	طول تقریبی (km)	حداکثر عبوری (A)	حداکثر توان ظاهری (MVA)
۵۰۱۲	۳۳	۲۲٫۵-۳۰	۸	۲۳۵	۱۳٫۵
۵۰۲۲	۳۳	۲۲٫۵-۳۰	۵٫۵	۱۱۵	۵٫۶

نام فیدر	شماره بار	توان ظاهری (مگاوات)	ضریب توان	نوع اتصال	R (اهم)	L (میلی هانری)
۵۰۱۲	۱	۲	۰٫۸۷	Y	۴۷۳٫۶	۸۵۴٫۳
	۲	۲٫۵	۰٫۹	Y	۳۹۲٫۰۲	۶۰۴٫۳۸
	۳	۵	۰٫۸۵	Y	۱۸۵٫۱۳	۳۶۵٫۲
	۴	۴	۰٫۸۸	Δ	۷۱۸٫۷۵	۱۲۳۴٫۸
۵۰۲۲	۱	۲٫۸	۰٫۸۵	Δ	۹۹۱٫۷۱	۱۹۵۶٫۳۵
	۲	۲٫۸	۰٫۸۵	Δ	۹۹۱٫۷۱	۱۹۵۶٫۳۵
	۳	۱	۰٫۹	Δ	۲۹۴۰٫۳	۴۵۳۲٫۹

آنجا که با این فیدر فقط از لحاظ میزان جریان عبوری از آن کار داریم و محل قرارگرفتن بارها برای ما اهمیتی ندارد، بارها را به صورت متمرکز، در یک نقطه و با اتصال مثلث فرض کرده ایم. بارهای متصل به سیستم تحت مطالعه در جدول ۳ آورده شده اند.

#### ۴- بررسی حالت های گوناگون در سیستم قدرت

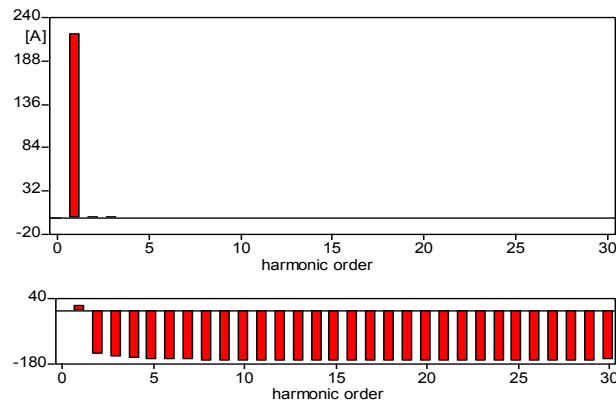
یکی از مهم ترین مراحل کار که در بالابردن دقت رله تشخیص دهنده HIF بسیار مهم می باشد، به دست آوردن اطلاعات و داده هایی است که برای استخراج الگوریتم رله مورد استفاده قرار می گیرد. این اطلاعات باید حالت های گوناگون عملکرد سیستم قدرت مورد مطالعه را در بر داشته باشد. آنچه کار را مشکل می کند این است که رله باید علاوه بر تشخیص HIF بتواند حالات عادی سیستم را که ممکن است پارامترهایی شبیه HIF داشته باشند نیز تشخیص داده و آن را از HIF جدا کند. در حقیقت دسته بندی و جداسازی خطای امپدانس بالا از سایر خطاها و نیز از عملکرد عادی سیستم قدرت، مهم ترین کار رله تشخیص دهنده خطای HIF می باشد. برای این منظور باید با ایجاد شبیه سازی حالات مختلف سیستم،

سیستم شبیه سازی شده، بخشی از پست کشاورزی اهواز می باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. پست کشاورزی اهواز ۱۳۲/۳۳/۱۱ kV بوده و دارای ۲ ترانس با مشخصات ۲۷-۲۰ MVA و ۱۳۲/۱۱ kV و یک ترانس با مشخصات ۳۰-۲۲٫۵ MVA و ۳۳/۲۲٫۵ kV می باشد. جهت بررسی خطای امپدانس بالا، فیدرهای ترانس ۱۳۲/۳۳ kV شبیه سازی شده است. از سه فیدر متصل به این ترانس یکی از فیدرها قطع بوده و جریان های ثبت شده برای حداکثر جریان این فیدرها در یک روز تابستانی به شرح نشان داده شده در جدول ۲ می باشد. این دو فیدر هر کدام مناطقی از شهر اهواز را تغذیه می کنند و مجموعاً تا ۲۰ مگاوات آمپر از ترانس، توان دریافت نموده اند. برای مدل سازی بارهای متصل شده در نقاط مختلف این فیدر، با توجه به [۱۵] از بارهای کلاسیک معرفی شده در EMTP استفاده نموده ایم که مقادیر این بارها در جدول ۲ بیان شده است. در شرایط عادی سیستم فرض بر این است که بارها به صورت متعادل سه فاز بوده و با اتصالات ستاره یا مثلث به شبکه متصل شده اند. برای فیدر اصلی مورد بررسی یعنی فیدر ۵۰۱۲ پست کشاورزی، فرض شده که بارها در طول خط توزیع شده و با اتصال ستاره به شبکه متصل هستند. دلیل انتخاب این ساختار این است که وقوع خطای امپدانس بالا را در نقاط مختلف شبکه مورد بررسی قرار دهیم. برای فیدر ۵۰۲۲ نیز از جدول ۳، بارهای گوناگون سیستم قدرت تحت مطالعه.

### Archival of SID

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

File m\_hif4\_33.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.1 Final Time: 0.12



شکل ۵: شرایط کلیدزنی بارهای بزرگ.

خطاهای امپدانس بالا معین شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت بیان شده در قالب اصول شش‌گانه زیر قابل بیان است.

#### ۴-۳ اصل ۱

خطاهای امپدانس بالا دارای طیف هارمونیک مربوط به خود بوده و می‌توان آنها را بر اساس همین طیف هارمونیک تشخیص داد. برای مثال طیف هارمونیک فاز A در شش پدیده مختلف در شکل‌های ۴ تا ۹ نشان داده شده است. از این شکل‌ها کاملاً مشخص است که طیف هارمونیک خطای امپدانس بالا با سایر اتفاقات سیستم کاملاً متفاوت خواهد بود و می‌توان خطا را بر اساس هارمونیک‌های آن مشخص نمود. لذا با بررسی این شبیه‌سازی‌ها می‌توان اثبات کرد که خطاهای HIF را می‌توان بر اساس بررسی طیف هارمونیک جریان آنها تشخیص داد.

#### ۴-۴ اصل ۲

نسبت هارمونیک‌های تغییر یافته پس از وقوع خطای امپدانس بالا به مؤلفه اصلی جریان، وابسته به میزان بار فیدر است. بر اساس این اصل و با توجه به امکان تغییر مداوم جریان بار در فیدرهای توزیع، برای تشخیص خطای امپدانس بالا بر اساس تحلیل‌های هارمونیک، لازم است وضعیت هارمونیک‌های ناشی از وقوع خطای امپدانس بالا و یا هر پدیده دیگر، مستقل از بار شبکه مورد توجه قرار گیرد. به همین منظور در الگوریتم پیشنهادی، به جای استفاده از نسبت هارمونیک‌ها به هارمونیک اصلی یا استفاده از اندازه قدر مطلق هر هارمونیک، از رابطه زیر برای محاسبه مقدار نسبی هارمونیک‌ها استفاده می‌کنیم

$$\frac{I_h}{|I_1 - I_L|} \quad (7)$$

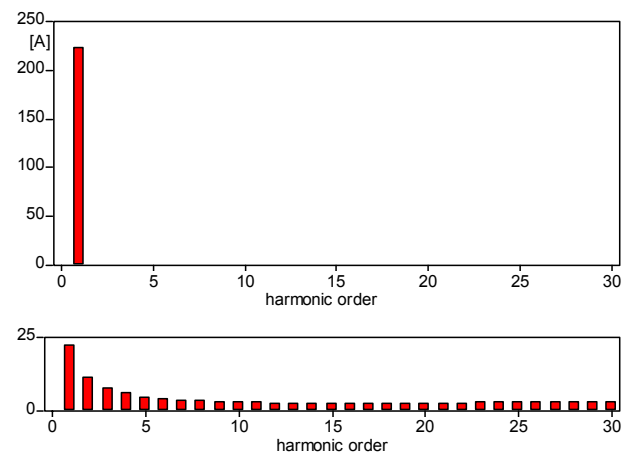
که در آن،  $I_h$  مقدار مؤثر هارمونیک  $h$  ام جریان،  $I_1$  مقدار مؤثر مؤلفه اصلی جریان پس از وقوع خطا و  $I_L$  مقدار مؤثر مؤلفه اصلی جریان بار است که پیش از خطا اندازه‌گیری شده و در رله ذخیره گردیده است. از (۷) مشخص است که اثر جریان بار در محاسبه نسبت هارمونیک‌ها حذف شده و بدین صورت می‌توان تعریف کارا تر و دقیق‌تری برای نسبت هارمونیک‌های جریان به مؤلفه اصلی را ارائه داد.

#### ۴-۵ اصل ۳

با وقوع خطای امپدانس بالا، تمامی هارمونیک‌ها به یک اندازه تغییر نمی‌کنند.

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

File m\_hif4.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.28 Final Time: 0.3



شکل ۴: شرایط عادی کار فیدر.

داده‌های مناسب برای دستیابی به الگوریتم دقیق و کامل رله تشخیص‌دهنده خطا را فراهم آورد. حالات خطای شبیه‌سازی شده شامل هر دو نوع خطای امپدانس بالا و خطای امپدانس پایین است. این حالت‌ها در بخش‌های بعد معرفی شده‌اند.

#### ۴-۱ حالت ۱: شرایط عادی سیستم و عدم وجود خطا

در حالتی که خطایی در سیستم وجود ندارد، پدیده‌های زیر شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است:

- ۱) کلیدزنی بانک‌های خازنی تا ۱ MVAR
- ۲) کلیدزنی بارهای غیر خطی در اندازه‌های مختلف از قبیل مبدل‌های ۶ پالس و موتورهای سه‌فاز بزرگ
- ۳) کلیدزنی مکرر بارهای خطی تک‌فاز و سه‌فاز در نقاط مختلف سیستم خصوصاً بارهای خطی سه‌فاز با ضرایب توان ناهمگون
- ۴) کلیدزنی ترانسفورماتورهای بدون بار

#### ۴-۲ حالت ۲: شرایط وجود خطا در سیستم

پدیده‌های زیر در زمانی که یکی از انواع خطا در سیستم وجود دارد، شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است:

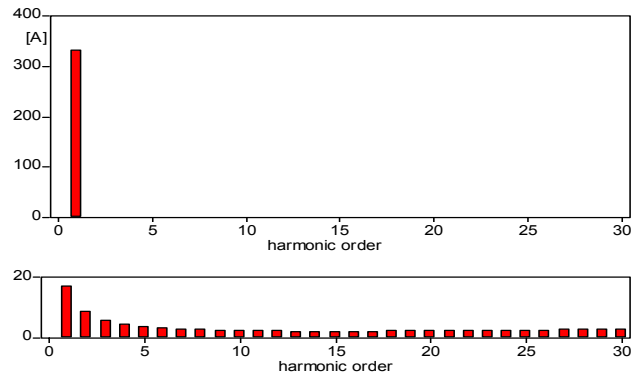
- ۱) وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت بدون هیچ گونه کلیدزنی
- ۲) وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت با وجود کلیدزنی بارهای بزرگ
- ۳) وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت با کلیدزنی خازن‌های مستقر در شبکه
- ۴) وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت در شرایط بی‌باری فیدر
- ۵) وجود خطای امپدانس پایین در شبکه قدرت
- ۶) وجود هم‌زمان خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین در شبکه قدرت

این شبیه‌سازی‌ها بر روی فیدر ۵۰۱۲ از پست کشاورزی اهواز انجام شده که در ادامه برای هر کدام از موارد فوق، نمونه‌ای از شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها همچنین بار سیستم در حالات مختلف بی‌باری و نیز ۲۵٪، ۶۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۰٪ بار کامل انجام شده است. همچنین محل وقوع خطا در ابتدا، وسط و انتهای فیدر در نظر گرفته شده است. بر اساس ترکیب حالات گفته‌شده، شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شده تا بر اساس آن رفتار و مشخصات

Archive of SID

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

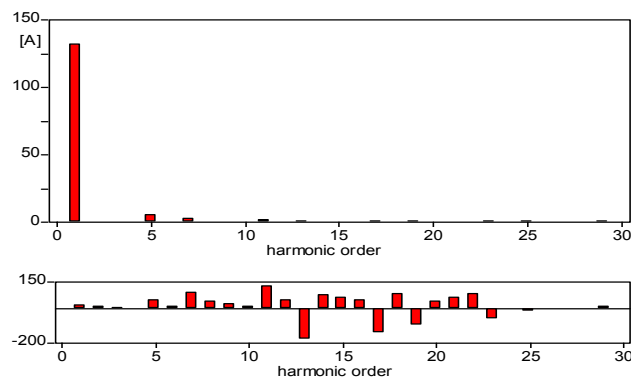
File m\_hif4\_19.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.28 Final Time: 0.3



شکل ۷: شرایط وقوع خطای تک‌فاز امپدانس پایین.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

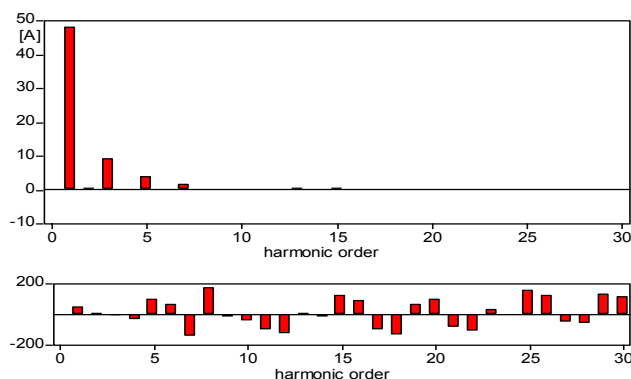
File m\_hif4\_52.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.28 Final Time: 0.3



شکل ۸: شرایط وجود درایو عیالسه.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

File m\_hif4\_93.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.28 Final Time: 0.3



شکل ۹: شرایط وقوع خطای امپدانس بالا.

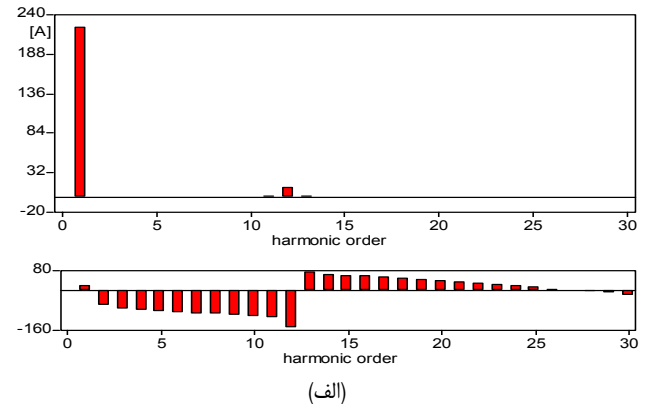
- هارمونیک سوم
- هارمونیک پنجم
- هارمونیک هفتم
- مؤلفه DC

همچنین با استفاده از خروجی‌های همین نرم‌افزار مشخص می‌شود که هارمونیک‌های ولتاژی زیر به ترتیب بیشترین همخوانی را با وقوع خطای امپدانس بالا داشته‌اند:

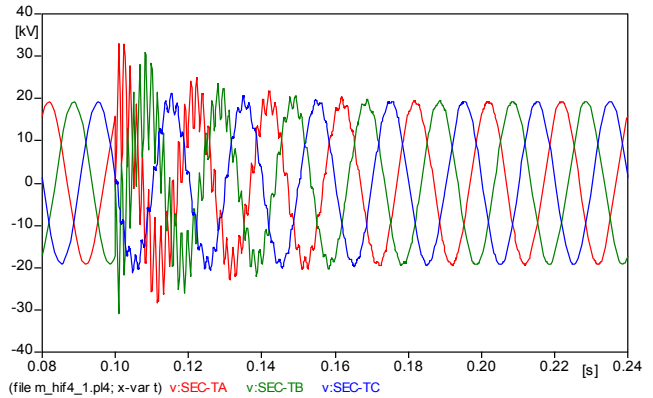
- هارمونیک پنجم
- هارمونیک هفتم
- هارمونیک نهم

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/13/09

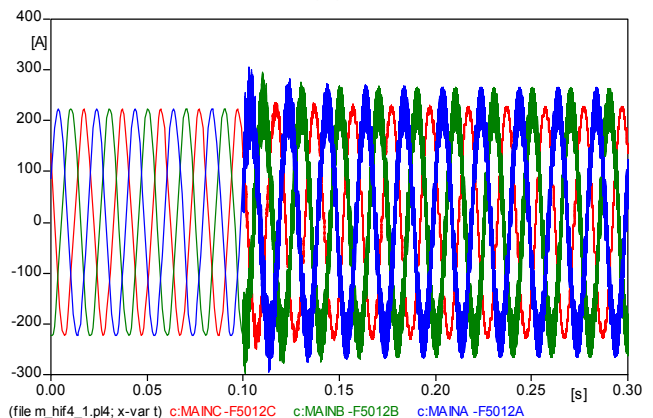
File m\_hif4\_1.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.1 Final Time: 0.12



(الف)



(ب)



(ج)

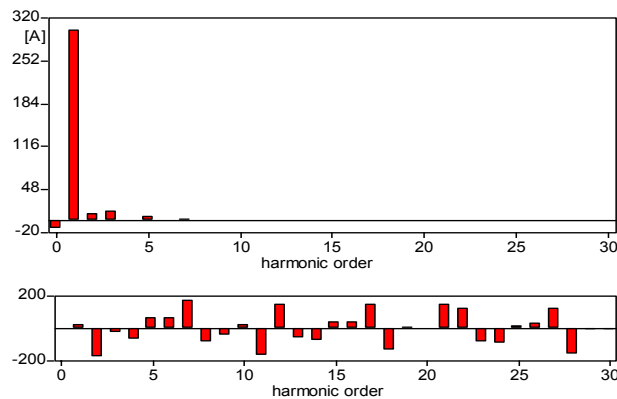
شکل ۶: کلیدزنی بانک خازنی، (الف) مؤلفه‌های هارمونیک، (ب) ولتاژهای سه‌فاز قبل و بعد از کلیدزنی و (ج) جریان‌های سه‌فاز قبل و بعد از کلیدزنی.

مسئله مهم دیگر در تشخیص HIF بر اساس طیف هارمونیک، شناسایی مهم‌ترین هارمونیک‌ها یا هارمونیک‌هایی است که بیشترین تمایز را بین حالت‌های دیگر و خطای امپدانس بالا ایجاد نمایند. به عبارت دیگر در این مرحله به دنبال هارمونیک‌هایی هستیم که بیشترین تغییرات معنادار را با وقوع HIF دارند. این کار در بسیاری از مقاله‌ها و کارهای گذشته با استفاده از مشاهده و مانتیورینگ این هارمونیک‌ها با دید انسانی انجام شده است. این روش ضمن آن که کاری مشکل و زمان‌بر است، همراه با خطا نیز می‌تواند باشد. در نتیجه در این مقاله از نرم‌افزار آماری SPSS جهت بررسی ارتباط بین هارمونیک‌های هر کدام از شکل موج‌ها با وقوع HIF استفاده شده است. از خروجی‌های نرم‌افزار SPSS در بررسی جریان‌ها کاملاً مشخص است که تغییرات هارمونیک‌های زیر به ترتیب بیشترین همخوانی و همخوانی را با وقوع HIF داشته است:

### Archive of SID

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/14/09

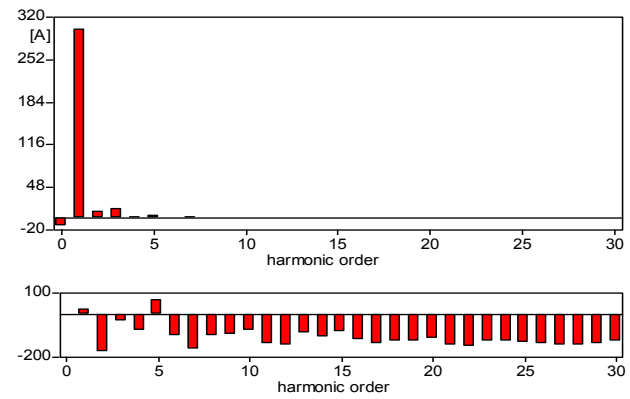
File m\_hif4\_75.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.18 Final Time: 0.2



شکل ۱۲: سیکل پنجم پس از وقوع HIF.

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/14/09

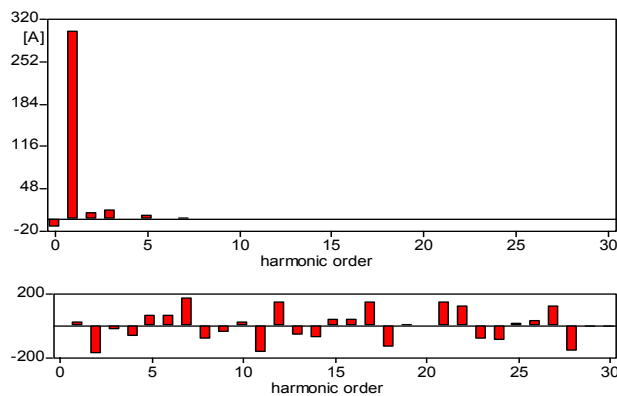
File m\_hif4\_75.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.1 Final Time: 0.12



شکل ۱۰: سیکل اول پس از وقوع HIF.

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/14/09

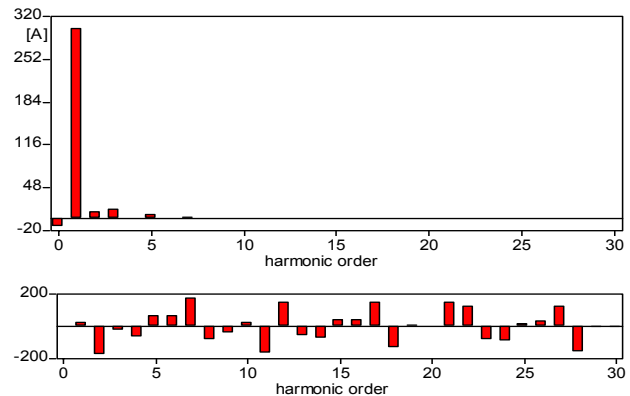
File m\_hif4\_75.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.28 Final Time: 0.3



شکل ۱۳: سیکل دهم پس از وقوع HIF.

#### MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 11/14/09

File m\_hif4\_75.pl4 Variable c:MAINA -F5012A [peak]  
Initial Time: 0.12 Final Time: 0.14



شکل ۱۱: سیکل دوم پس از وقوع HIF.

نمی‌کنند، این تأخیر در تشخیص و بررسی چند سیکل بعد، اشکالاتی را در کار حفاظت ایجاد نمی‌کند.

### ۴-۷ اصل ۵

وقوع خطاهای امپدانس بالا در یک فاز تغییرات چندانی را در فازهای دیگر به وجود نمی‌آورد. بر این اساس لازم است برای هر فاز یک واحد تشخیص جداگانه داشته باشیم.

### ۴-۸ اصل ۶

پس از وقوع هر اتفاقی در سیستم قدرت، حداقل یکی از هارمونیک‌های جریان یا ولتاژ، بیش از ۱۰٪ تغییر خواهد کرد. با توجه به این که هر رله‌ای برای ورود به مرحله شناسایی و تشخیص نیازمند آن است که تحریک شود یا به عبارت دیگر Pick up داشته باشد، از این اصل برای تنظیم لحظه شروع پروسه تشخیص خطا استفاده شده است.

### ۵- الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا

بر اساس اصول شش‌گانه فوق، الگوریتمی برای تشخیص خطا طراحی شده و نرم‌افزار مبتنی بر آن در رله نصب و اجرا شده است. الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

بر اساس این الگوریتم در هر لحظه، جریان و ولتاژ سه‌فاز تحت حفاظت با سرعت مناسبی نمونه‌گیری خواهد شد. سرعت نمونه‌گیری باید به گونه‌ای باشد که بتوان هارمونیک‌های مورد نیاز را از داده‌های ثبت‌شده

این تحلیل با اعتبار ۹۵٪ انجام شده و دقت آن بسیار بالاست و با استفاده از آن با قطعیت می‌توان بیان نمود که HIF بیشترین تمایز را با استفاده از این هارمونیک‌ها دارد و در واقع این هارمونیک‌ها می‌توانند مشخص‌کننده وقوع یا عدم وقوع HIF باشند.

### ۴-۶ اصل ۴

خطای امپدانس بالا پس از وقوع، حالت نسبتاً ماندگاری (در چند سیکل) دارد.

بسیاری از حالت‌هایی که در مراحل شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و در واقع حالت‌های غیر عادی سیستم بودند دارای ماهیت گذرا هستند. به این معنی که از سیکل دوم به بعد اثرات آنها به دلیل خاصیت میرایی ذاتی شبکه کاهش می‌یابد. این در حالی است که رفتار خطای امپدانس بالا، یک حالت نسبتاً ماندگارتری دارد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ کاملاً مشخص است که میزان اندازه و هارمونیک‌های جریان و ولتاژ پس از سیکل دوم تقریباً یکسان و بدون تغییر بوده است. بر اساس این اصل می‌توان به این نکته رسید که برای تشخیص HIF می‌توان تا چند سیکل پس از وقوع خطا را بررسی نمود و بر اساس آن، وضعیت وقوع خطا را به طور دقیق مشخص کرد.

البته ذکر این نکته لازم است که پس از وقوع HIF الزامی وجود ندارد که رله و بریکر آن در چند صد میلی ثانیه خطا را تشخیص دهند و رفع کنند. در واقع با توجه به این که معمولاً هنگام وقوع HIF، جریان‌های ناشی از آن، خطرات خاصی را در کوتاه‌مدت برای اجزای شبکه ایجاد





شکل ۱۵: تصویر رله ساخته شده.

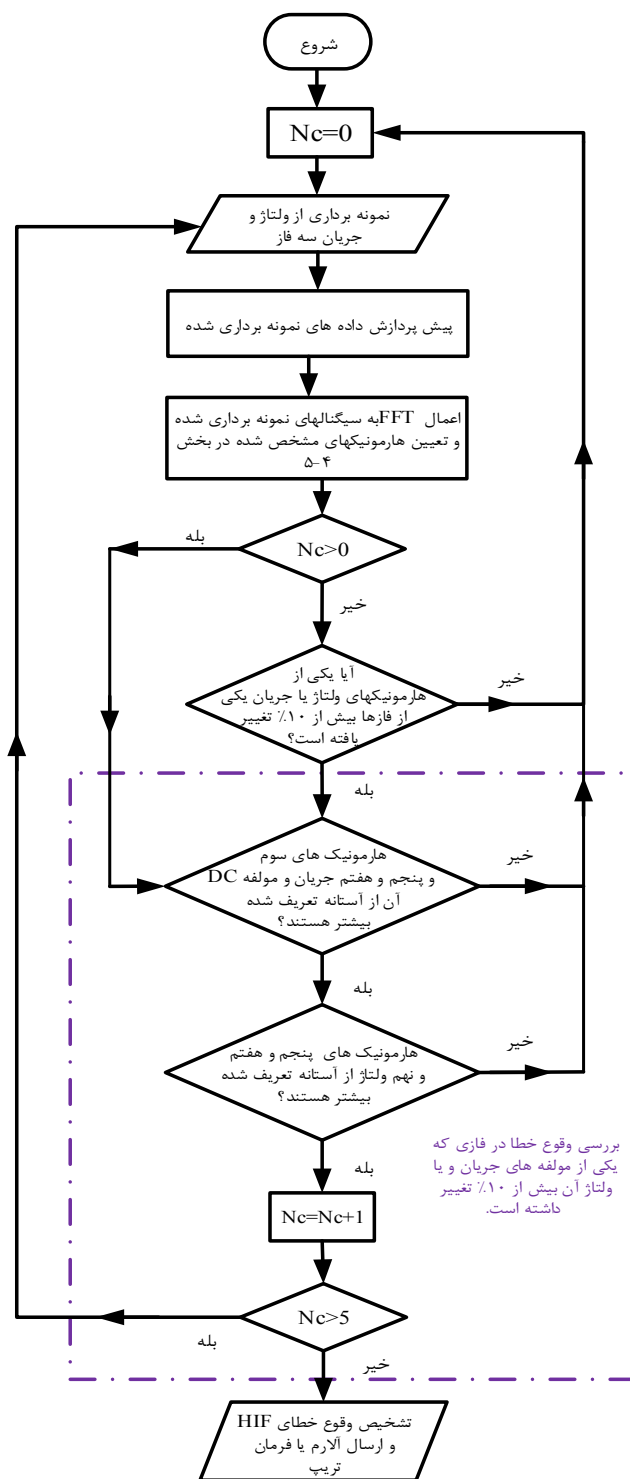
را تشخیص ندهد، الگوریتم رله به ابتدا برگشته و ریست می‌شود. اما اگر رله تشخیص دهد که اندازه هارمونیک‌های بررسی شده با شرایط خطا مطابقت دارد، بر اساس اصل ۴ که بیان می‌کند رفتار این خطا در چند سیکل باید تکرار شود، رله شمارنده  $N_c$  را که برابر تعداد سیکل‌هایی است که خطا در آنها تشخیص داده شده است یکی اضافه می‌کند و مجدداً به ابتدای حلقه برمی‌گردد. اگر واقعاً خطا افتاده باشد، باید در چند سیکل اندازه هارمونیک‌های بررسی شده بیش از آستانه تعیین شده برای رله باشد. پس در سیکل‌های بعد هم اگر رله تشخیص داد که طیف هارمونیک‌های جریان با شرایط وقوع خطا صدق می‌کند، به شمارنده  $N_c$  دوباره افزوده می‌شود. اگر برای ۵ سیکل مداوم اندازه هارمونیک‌ها مطابق شرایط وقوع خطای امپدانس باشد، رله تشخیص خطا داده و فرمان آلارم یا تریپ را بر اساس نیاز ارسال می‌کند. انتخاب عدد ۵ سیکل هم بر اساس بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها است که بر اساس آن سایر پدیده‌های ذکر شده در بخش ۴-۱ نمی‌توانند برای ۵ سیکل متوالی رفتار نسبتاً ماندگار و ثابتی برای مؤلفه‌های هارمونیک‌های جریان و ولتاژ ایجاد کنند و مقدار کاهش‌ی خواهند داشت. حال آن که پس از وقوع HIF در طول این ۵ سیکل هارمونیک‌های جریان از ثبات برخوردار بوده و از حد آستانه تعریف شده در رله کمتر نخواهند شد.

## ۶- طراحی و ساخت سخت‌افزار رله HIF

قسمت‌های مختلف سخت‌افزار رله پیشنهاد شده در این مقاله در اینجا توضیح داده می‌شود. در طراحی و ساخت این رله، علاوه بر توانایی پردازش الگوریتم بیان شده در بخش‌های قبل، به این نکته توجه گردیده که از تجهیزاتی استفاده شود که قیمت تمام شده آن را با حفظ دقت و ضریب اطمینان، در اقتصادی‌ترین مقدار ممکن نگه دارد. در رابطه با گزارش‌گیری و ارسال فرمان نیز، رله به صورتی ساخته شده که اطلاعات مربوط به آن هم در نمایشگر خود دستگاه و هم توسط سیم رابط در کامپیوتر قابل مشاهده است. همچنین این رله دارای پورت‌های خروجی لازم برای ارسال فرمان تریپ است. نمایی از رله ساخته شده در شکل ۱۵ نشان داده شده و بخش‌های مختلف سخت‌افزار این رله در ادامه توصیف گردیده است.

### ۶-۱ پردازنده FFT (تبدیل فوریه سریع)

بر اساس الگوریتم طراحی شده برای رله، برای تشخیص خطای امپدانس بالا لازم است هارمونیک‌های مختلف جریان و ولتاژ هر فاز را محاسبه نمود. بر این اساس و با توجه به این که داده‌های ورودی به صورت گسسته نمونه‌برداری می‌شوند، برای استخراج این هارمونیک‌ها از تبدیل فوریه سریع (FFT) استفاده شده است.

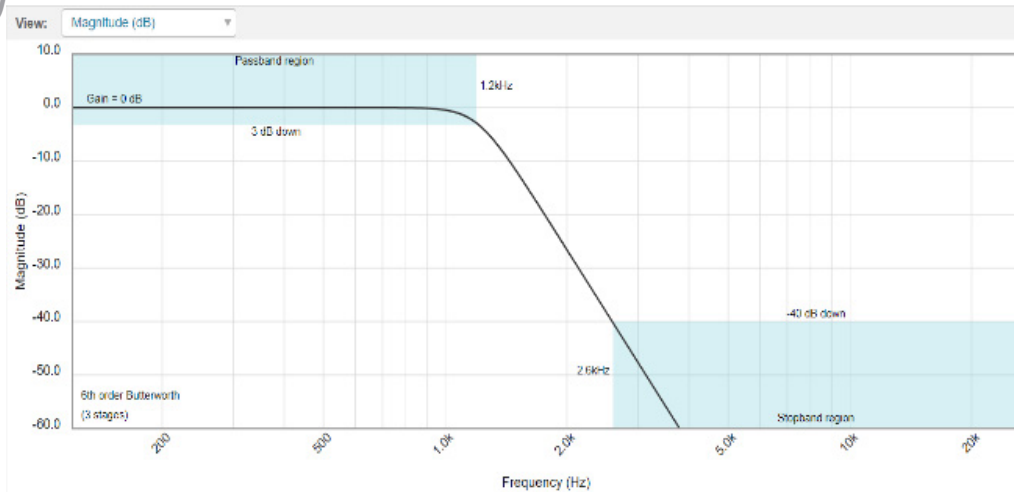


شکل ۱۴: الگوریتم پیشنهادی برای رله HIF.

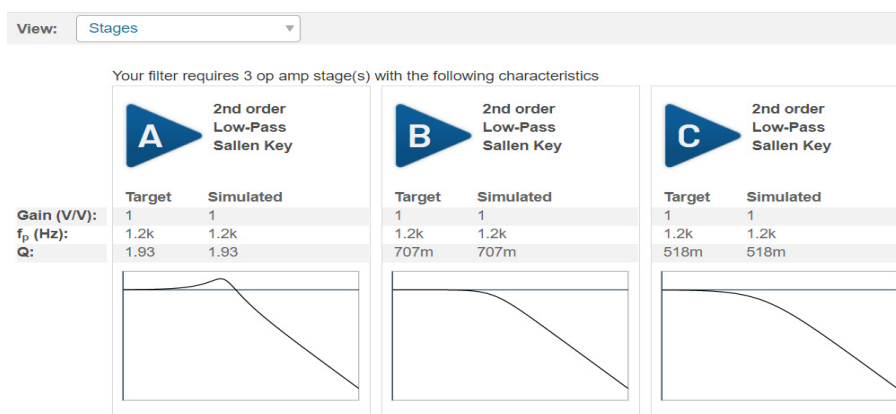
استخراج نمود. در مرحله بعد با استفاده از تبدیل فوریه، هارمونیک‌های مورد نیاز استخراج می‌گردد. هارمونیک‌های مورد نیاز در اصل ۳ (بخش ۴-۵) بیان شده‌اند. البته نتایج به دست آمده از تست‌های مختلف نشان می‌دهد که این رله فقط با هارمونیک‌های جریان نیز قادر به تشخیص خطای امپدانس بالا خواهد بود.

بر اساس الگوریتم نشان داده شده در شکل ۱۴، هارمونیک‌های ولتاژ و جریان هر سه فاز مرتباً سنجیده می‌شوند و در صورتی که در یکی از فازها تغییرات بیش از ۱۰٪ حداقل در یکی از هارمونیک‌های مشخص شده در اصل ۳ دیده شود، رله پروسه بررسی احتمال وقوع خطای امپدانس بالا در آن فاز را شروع می‌کند. اگر شرایط هارمونیک‌های جریان و ولتاژ، وقوع خطا

## Archive of SID



شکل ۱۶: پاسخ فرکانسی فیلتر رله، شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار ISIS و تست‌شده در نرم‌افزار آنلاین ارائه‌گردیده در [۳۷].



شکل ۱۷: مشخصات سه مرحله مورد نیاز برای طراحی فیلتر رله.

نیاز، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای که باید وارد پرسور رله شوند از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شوند. برای طراحی فرکانس قطع فیلتر مورد نیاز در این رله، بار دیگر لازم است به بالاترین هارمونیک مورد نیاز توجه شود. با توجه به دستگاه ساخته‌شده باید مقادیر دامنه برای پانزده هارمونیک اول سیگنال ورودی را محاسبه کرد. لازم است که فرکانس قطع را با فاصله مناسبی از فرکانس ۷۵۰ Hz انتخاب کنیم تا فیلتر اثر تضعیفی بر روی هارمونیک‌های تا مرتبه پانزدهم اعمال نکند. در واقع دلیل حذف مؤلفه‌های بالاتر از ۷۵۰ Hz آن است که اولاً الگوریتم رله وابسته به این مؤلفه‌ها نیست و ثانیاً ممکن است تحت تأثیر قسمت غیر خطی نمودار پاسخ فرکانسی فیلتر، پاسخی با خطای بالا استخراج شود. بر این اساس، فرکانس ۱۲۰۰ Hz به عنوان فرکانس قطع این فیلتر انتخاب شده است. برای تأمین ضریب تضعیف مناسب، یک فیلتر Butterworth مرتبه ششم با توپولوژی Sallen-key طراحی شده که دارای فرکانس قطع ۱۲۰۰ Hz بوده و بهره آن نیز ۱ است. شیب مناسب تضعیف این فیلتر باعث می‌شود که از نقطه ۹۶۰ Hz که اولین تأثیر در منحنی پاسخ فرکانسی مشاهده می‌شود تا سایر فرکانس‌های بالاتر از فرکانس قطع فیلتر، تضعیف مورد نیاز را به روی داده‌های ورودی اعمال نماید.

برای طراحی این فیلتر از نرم‌افزار ISIS استفاده شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار آنلاین ارائه‌گردیده در [۳۷] مجدداً بررسی شده است. شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ خروجی‌های این نرم‌افزار آنلاین هستند. پاسخ فرکانسی مورد نیاز برای فیلتر در شکل ۱۶ نشان داده شده که بر اساس

برای طراحی FFT فرض شده که تا هارمونیک سی و دوم جریان و ولتاژ توسط رله قابل اندازه‌گیری باشند. هرچند برای شناسایی HIF لازم است صرفاً تا هارمونیک نهم را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، فرکانس بیشترین هارمونیک مورد نیاز ۱۶۰۰ Hz است. این هارمونیک را می‌توان بسته به تعداد نمونه‌های گرفته‌شده از شکل موج‌های ورودی، با دقت‌های متفاوتی به دست آورد. با توجه به این که بیشترین فرکانسی که باید اندازه‌گیری شود ۱۶۰۰ Hz است، طبق قضیه نایکوئیست، فرکانس نمونه‌برداری باید حداقل ۲ برابر این مقدار باشد که برابر است با

$$F_{\text{sample}(\min)} = 2 \times F_{\text{max},h} = 3200 \text{ Hz} \quad (8)$$

همچنین در طراحی این رله، تعداد نمونه‌های ثبت‌شده ولتاژ/جریان در هر سیکل ( $N$ ) برابر ۱۰۲۴ عدد انتخاب شده است. در نتیجه رزولوشن این نمونه‌برداری به صورت زیر خواهد بود

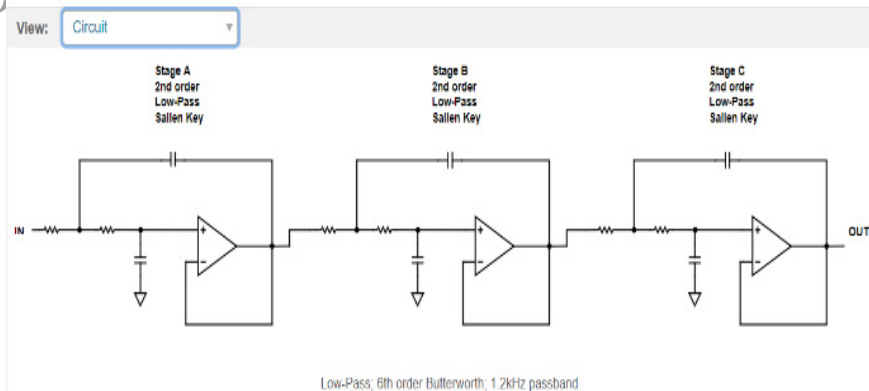
$$\text{Resolution} = \frac{3200}{1024} = 3.125 \text{ Hz} \quad (9)$$

قابل ذکر است که اگرچه مبنای نمونه‌برداری برای هارمونیک‌های تا مرتبه سی و دوم طراحی شده است، اما عملاً فقط ۱۵ هارمونیک اجازه ورود به پرسور رله را پیدا خواهند کرد که این موضوع در بخش بعد توضیح داده شده است. از سایر هارمونیک‌ها می‌توان برای اهداف مرتبط با تشخیص کیفیت توان شبکه استفاده نمود.

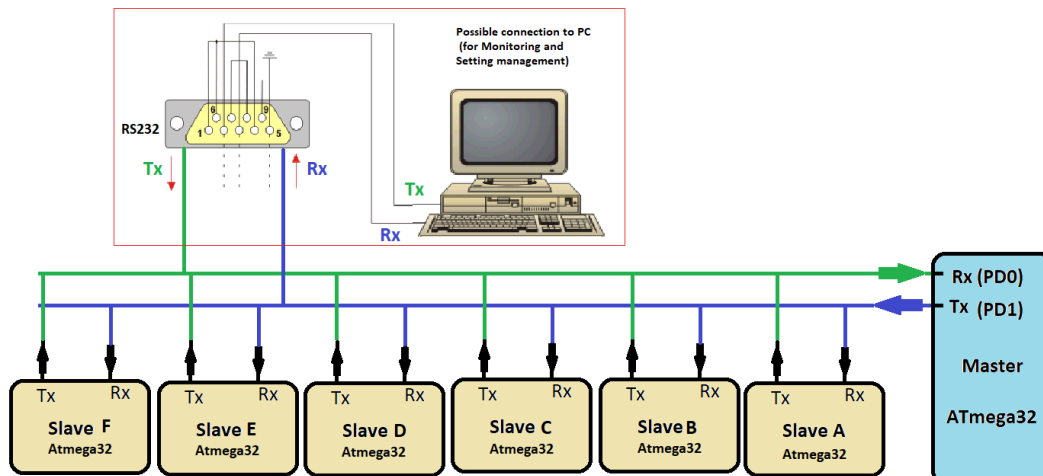
## ۶-۲ فیلتر پایین‌گذر

برای تضعیف هارمونیک‌های با مرتبه بالاتر از هارمونیک‌های مورد

## Archive of SID



شکل ۱۸: مدار فیلتر مرتبه ششم مورد استفاده در رله.



شکل ۱۹: ساختار کلی انتقال داده در رله HIF ساخته شده و نحوه ارتباط میکروهای Master و Slave و کامپیوتر خارجی (در صورت نیاز).

آن میزان تضعیف اعمالی در فرکانس‌های مختلف را می‌توان یافت. با توجه به آنچه در شکل ۱۷ نشان داده شده است، این فیلتر دارای سه مرحله است که گین و سایر مشخصات هر مرحله در این شکل قابل مشاهده است. در نهایت، شکل ۱۸ مدار کلی طراحی پیاده‌شده برای فیلتر مورد نیاز رله HIF را نشان می‌دهد.

شکل ۱۹: ساختار کلی انتقال داده در رله HIF ساخته شده و نحوه ارتباط میکروهای Master و Slave و کامپیوتر خارجی (در صورت نیاز).

آن میزان تضعیف اعمالی در فرکانس‌های مختلف را می‌توان یافت. با توجه به آنچه در شکل ۱۷ نشان داده شده است، این فیلتر دارای سه مرحله است که گین و سایر مشخصات هر مرحله در این شکل قابل مشاهده است. در نهایت، شکل ۱۸ مدار کلی طراحی پیاده‌شده برای فیلتر مورد نیاز رله HIF را نشان می‌دهد.

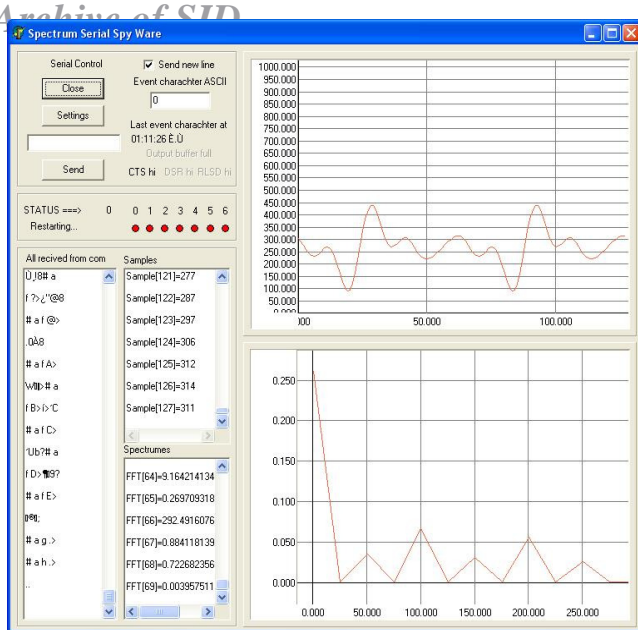
### ۳-۶ میکروکنترلر و استراتژی پردازش اطلاعات رله

برای میکروکنترلر این رله از Atmel AVR استفاده شده و از میان آن نیز خانواده ATmega انتخاب گردید. این خانواده دارای تراشه‌های متنوعی می‌باشد که از نظر تعداد امکانات جانبی و حجم حافظه با هم متفاوت هستند. با توجه به میزان محاسبات مورد نیاز رله، میکروکنترلر ATmega32 به دلیل قابلیت‌ها و قیمت مناسب آن انتخاب گردید. در مورد استراتژی پردازش اطلاعات نیز با توجه به این که لازم است هارمونیک‌های شش شکل موج ولتاژ و جریان هر سه فاز به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شوند، باید به گونه‌ای عمل نمود که این سیگنال‌ها به صورت هم‌زمان نمونه‌برداری و آنالیز شوند، در غیر این صورت داده‌های تحلیل شده در رله با هم سنکرون نخواهند بود.

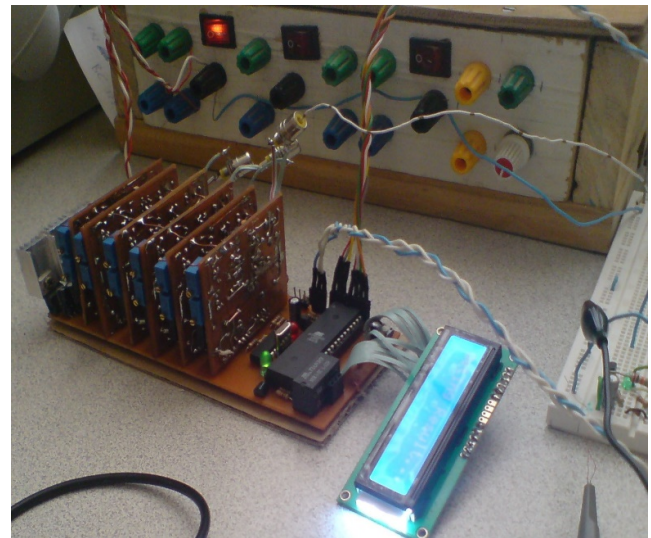
برای رسیدن به این هدف، همان گونه که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، از شش میکروکنترلر مجزا به عنوان Slave استفاده شده که توسط یک میکروکنترلر مرکزی که نقش Master را دارد، کنترل می‌شوند. ارتباط بین این میکروکنترلرها به صورت سریال است و ساختار ارتباطی به گونه‌ای طراحی شده که بتوان کامپیوتر را نیز به عنوان یک ابزار جانبی دیگر به این شبکه متصل کرد. به این ترتیب تمام پیام‌های رد و بدل شده بین Master و Slave‌ها توسط کامپیوتر قابل پیگیری است. البته

### ۷- آزمایش‌های انجام‌شده بر روی رله

برای آزمایش رله ساخته‌شده، ابتدا نرم‌افزارهای آن و سپس مجموعه رله مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۲۱ نمایی از برنامه ایجادشده برای آزمایش الگوریتم FFT را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت سنجش دقیق هارمونیک‌ها در صحت این دستگاه، صحت عملکرد الگوریتم FFT رله



شکل ۲۱: تست صحت هارمونیک‌های استخراجی از موج‌های ورودی با استفاده از شکل موج‌های با هارمونیک‌های معلوم.



شکل ۲۰: برد داخلی رله HIF ساخته شده و وضعیت اتصال میکروکنترلرهای Slave.

جدول ۴: حالت‌های مختلف مورد استفاده برای آزمایش عملکرد رله ساخته شده.

عملکرد رله	فازهای تحت خطا	میزان مقاومت (در صورت وجود)	محل وقوع	میزان بار سیستم	نوع اتفاق
بدون عملکرد	۱	۱	۱	۵	سوییچینگ بانک‌های خازنی تا ۱ MVAR
بدون عملکرد	۱	۱	۲	۵	سوییچینگ و وجود بارهای غیر خطی در اندازه‌های مختلف از قبیل مبدل‌های ۶ پالس و ۱۲ پالس
بدون عملکرد	۳	۱	۲	۵	سوییچینگ مکرر بارهای خطی تک‌فاز و سه‌فاز در نقاط مختلف شبکه خصوصاً بارهای خطی سه‌فاز با ضرایب توان ناهمگون با شبکه
بدون عملکرد	۱	۱	۱	۲	سوییچینگ ترانسفورماتورهای بدون بار
ارسال فرمان قطع	۷	۵	۳	۵	وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت بدون هیچ گونه کلیدزنی
ارسال فرمان قطع	۲	۲	۲	۳	وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت با کلیدزنی خازن‌های مستقر در شبکه
ارسال فرمان قطع	۲	۲	۲	۳	وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت با وجود کلیدزنی بارهای بزرگ
ارسال فرمان قطع	۷	۲	۳	۱	وجود خطای امپدانس بالا در سیستم قدرت در شرایط بی‌باری فیذر
بدون عملکرد	۷	۱	۳	۵	وجود خطای امپدانس پایین در شبکه قدرت
ارسال فرمان قطع	۷	۵	۳	۵	وجود هم‌زمان خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین در شبکه قدرت

دیده می‌شود یعنی دو یا پنج حالت از حالات تعریف شده برای میزان بار شبیه‌سازی گردیده است. در ستون سوم که محل وقوع خطا یا نصب یک تجهیز را توصیف می‌کند، سه مکان برای وقوع خطا یا نصب تجهیز پیش‌بینی شده که عبارتند از ابتدای خطا، وسط یا انتهای آن. مثلاً عدد ۳ در این ستون به معنی آن است که وقوع پدیده مورد نظر در هر سه مکان شبیه‌سازی شده است. در ستون چهارم نحوه انتخاب پارامترهای مورد نیاز برای مدل خطای HIF بیان شده است. در اینجا، پنج حالت مختلف که قبلاً در جدول ۱ توصیف شد، مورد استفاده قرار گرفته است. درج عدد ۲ در این ستون به معنی آن است که از ۵ حالت بیان شده در جدول ۱، صرفاً ۲ حالت شبیه‌سازی شده است.

همچنین تعداد حالات فازهای تحت خطا در ستون ۵ توصیف شده است. اگرچه در اکثر قریب به اتفاق حالات، خطاهای امپدانس بالا به صورت تک‌فاز اتفاق می‌افتد ولی برای آن که حالت‌های احتمالی دیگر هم بررسی شوند، خطاهای شامل AG، BG، CG، ABG، ACG، BCG و ABCG تعریف و شبیه‌سازی شده‌اند. بر این اساس، درج عدد ۲ در ستون پنجم این جدول نشان‌دهنده آن است که دو حالت از بین ۷ حالت

نقش به سزایی در صحت عملکرد رله دارد. به این منظور، شکل موج نشان داده شده در بالای شکل ۲۱ که شامل هارمونیک‌های معمولی است، به رله اعمال شده است. نمودار پایینی شکل ۲۱، هارمونیک‌های موجود در شکل موج ورودی را نشان می‌دهد که مقادیر آن دقیقاً با هارمونیک‌های تشکیل‌دهنده موج ورودی برابر است.

پس از اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم هارمونیک‌سنجی رله، عملکرد کلی رله برای حالات مختلف کارکرد سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این کار، حالات بیان شده در جدول ۴ ابتدا در نرم‌افزار EMTP شبیه‌سازی شد و سپس فایل‌های شامل خروجی‌های شبیه‌سازی (جریان و ولتاژ در محل نصب رله) استخراج و برخی از آنها به رله اعمال گردید. اعداد بیان شده در ستون‌های مختلف جدول ۴ بیان‌کننده تعداد حالت‌هایی است که برای هر اتفاق شبیه‌سازی شده و رفتار رله برای آن اتفاق تحلیل و بررسی گردیده است.

ستون دوم از سمت راست جدول ۴ میزان حالات مختلف بار سیستم را نشان می‌دهد. بار سیستم از بین ۵ مقدار مختلف (یعنی بی‌باری، ۲۵٪، ۶۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۰٪) انتخاب شده و مثلاً اگر در این جدول عدد ۲ یا ۵

- [3] M. Torres, J. L. Guardado, H. F. Ruiz, and S. Maximov, "Modeling and detection of high impedance faults," *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 163-172, Oct. 2014.
- [4] S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, and P. K. Dash, "High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network," *IET Gen. Trans. Dist.*, vol. 2, no. 2, pp. 261-270, Apr. 2008.
- [5] A. H. Etemadi and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system," *IET Gen. Trans. Dist.*, vol. 2, no. 1, pp. 110-118, Feb. 2008.
- [6] E. M. Lima, N. Brito, and B. Alencar, "High impedance fault detection based on Stockwell transform and third harmonic current phase angle," *Electric Power Systems Research*, vol. 175, no. 6, pp. 1-14, Nov. 2019.
- [7] D. A. Gadanayak and R. K. Mallick, "Interharmonics based high impedance fault detection in distribution systems using maximum overlap wavelet packet transform and a modified empirical mode decomposition," *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, vol. 112, pp. 282-293, Nov. 2019.
- [8] A. Ghaderi, H. L. Ginn, and H. A. Mohammadpour, "High impedance fault detection: a review," *Electric Power System Research*, vol. 143, pp. 376-388, Feb. 2017.
- [9] M. Thomas, N. Bhaskar, and A. Prakash, "Voltage based detection method for high impedance fault in a distribution system," *J. Inst. Engineers, India: Ser. B*, vol. 9, no. 3, pp. 1-11, Jun. 2015.
- [10] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, and D. Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 397-407, Jun. 2005.
- [11] Y. Sheng and S. M. Rovnyak, "Decision tree-based methodology for high impedance fault detection," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 533-536, Mar. 2004.
- [12] A. Soheili, J. Sadeh, H. Lomei, and K. Muttaqi, "A new high impedance fault detection scheme: Fourier based approach," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power System Technology, POWERCON'16*, 6 pp., Wollongong, Australia, 28 Sept.-1 Oct. 2016.
- [13] M. Sedighzadeh, A. Rezazadeh, and N. I. Elkalashy, "Approaches in high impedance fault detection: a chronological review," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 114-128, Jun. 2010.
- [14] P. K. Nayak, K. Sarwagya, and T. Biswal, "A novel high impedance fault detection technique in distribution systems with distributed generators," in *Proc. National Power Systems Conf., NPSC'16*, 6 pp., Bhubaneswar, India, 19-21 Dec. 2016.
- [15] E. M. Lima, et al., "High impedance fault detection method based on the short-time fourier transform," *IET Gen. Trans. Dist.*, vol. 12, no. 11, pp. 2577-2584, Jun. 2018.
- [16] A. R. Sedighi, M. R. Haghighifam, O. P. Malik, and M. H. Ghassemian, "High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2414-2421, Oct. 2005.
- [17] M. T. Yang, J. L. Guan, and J. C. Gu, "High impedance faults detection technique based on wavelet transform," *Int. J. Elec. Comp. Sys. Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 689-705, 2007.
- [18] A. Bansal and G. N. Pillai, "High impedance fault detection using LVQ neural networks," *Int. J. Comp. Info. Syst. Science and Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 701-693, 2007.
- [19] P. Routray, M. Mishra, and P. K. Rout, "High impedance fault detection in radial distribution system using s-transform and neural network," in *Proc. IEEE Power Communication and Information Technology Conf., PCITC'15*, pp. 545-551, Bhubaneswar, India, 15-17 Oct. 2015.
- [20] A. Etemadi and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system," *IET Gen. Tran. Dist.*, vol. 2, no. 1, pp. 110-118, Jan. 2008.
- [21] S. Silva, et al., "High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 474-483, Jan. 2018.
- [22] A. N. Milioudis, G. T. Andreou, and D. P. Labridis, "Detection and location of high impedance faults in multi-conductor overhead distribution lines using power line communication devices," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 894-902, Mar. 2015.
- [23] Q. Cui and Y. Weng, "Enhance high impedance fault detection and location accuracy via PMUs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp. 797-809, Jan. 2019.
- [24] S. Vlahinic, et al., "Back up protection scheme for high impedance faults detection in transmission systems based on synchrophasor

بیان شده در بالا انتخاب و شبیه‌سازی شده است.

به عنوان مثال، ردیف دوم جدول را که مربوط به اتفاق "سوییچینگ بانک‌های خازنی تا MVAR ۱" است، بررسی می‌کنیم. با توجه به آنچه در ستون دوم این ردیف آمده است، اثر سوییچینگ این بانک خازنی در پنج سطح مختلف بار شبکه شبیه‌سازی شده است. همچنین از ستون سوم این ردیف مشخص است که وجود این خازن صرفاً در یک محل بررسی شده است. ستون‌های چهارم و پنجم بیان‌کننده آن است که وضعیت فازهای درگیر تنها یک حالت داشته (خازن به هر سه فاز متصل بوده و امکان کار تک‌فاز ندارد) و مقاومت خطا هم در این کلیدزنی صرفاً یک حالت دارد (که به معنی عدم وجود مقاومت خطا است). نهایتاً در ستون آخر، عملکرد رله بیان شده که برای این مثال، مشاهده شده که در زمان وقوع "سوییچینگ بانک‌های خازنی تا MVAR ۱" در هر سطح باری از شبکه، رله HIF عملکرد نخواهد داشت و فرمان قطع ارسال نمی‌کند.

همان گونه که در جدول ۴ مشخص است، طیف گسترده‌ای از حالاتی که ممکن است در سیستم قدرت رخ دهد و نیز انواع مختلفی از اتفاقاتی که ممکن است شباهت‌هایی با خطای امپدانس بالا داشته باشند، شبیه‌سازی و بررسی شد. در همه حالات شبیه‌سازی شده، رله طراحی شده و الگوریتم پیشنهادی آن موفق به تشخیص خطای امپدانس بالا و تمایز آن با سایر اتفاقاتی شدند که باعث تغییرات هارمونیک در جریان و ولتاژ شبکه می‌شوند.

## ۸- نتیجه‌گیری

استفاده از رله‌های اضافه جریان به عنوان رله‌های اصلی حفاظت شبکه‌های توزیع، امری مرسوم است. با وجود این، برخی از خطاها که رفتار خاصی دارند توسط این رله‌ها قابل استفاده نیست و لازم است که رله‌هایی برای تشخیص آنها ساخته شود. یکی از مواردی که توسط رله‌های اضافه جریان قابل تشخیص نیست، خطاهای امپدانس بالاست که اولاً مقدار جریان آنها بسیار کم بوده و ثانیاً رفتاری غیر خطی دارند. در این مقاله روشی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا ارائه و نحوه ساخت نمونه عملی رله HIF نیز توصیف شده است. این روش بر روی سخت‌افزار ساخته شده پیاده‌سازی گردید و آزمون‌های آزمایشگاهی به صورت تزریق داده‌های شبیه‌سازی شده بر روی آن انجام پذیرفت. نتایج تست‌های انجام شده بر روی رله با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌هایی که توسط نرم‌افزار EMTP و بر اساس داده‌های واقعی از یکی از فیدرهای توزیع شرکت برق اهواز انجام شد، نشان از موفقیت رله در شناسایی خطای امپدانس بالا و تمایز قابل شدن بین این خطا و سایر پدیده‌های اتفاقی افتاده در شبکه توزیع دارد.

## ۹- سپاسگزاری

این مقاله از قرارداد طرح پژوهشی [۳۸] بین شرکت توزیع نیروی برق اهواز و دانشگاه شهید چمران استخراج شده که به این وسیله از حمایت‌های شرکت مذکور قدرانی به عمل می‌آید.

## مراجع

- [1] Y. S. Ko, T. K. Kang, H. Y. Park, H. Y. Kim, and H. S. Nam, "The FRTU-based fault-zone isolation method in the distribution systems," *IEEE Tran. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 1001-1009, Apr. 2010.
- [2] Y. S. Ko, "A self-isolation method for the HIF zone under the network-based distribution system," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 2, pp. 884-891, May 2009.

## Archive of SID

اسپانیا (UPC- Barcelona Tech) دریافت نمود و در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ به ترتیب به عنوان دانشجوی میهمان و پژوهشگر در دانشگاه سلطنتی فناوری استکهلم (KTH) سوئد به فعالیت علمی ادامه داد. دکتر منادی از سال ۱۳۹۶ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول به کار بوده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی همچون مدرن سازی تاسیسات الکتریکی، شبکه‌های DC، شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های اتوماسیون صنعتی می‌باشد.

**سید قدرت‌اله سیف‌السادات** در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت نمود. از سال ۱۳۷۱ الی ۱۳۷۷ نامبرده به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول تدریس بود و پس از آن به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۵ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر سیف‌السادات هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند حفاظت دیجیتال سیستم‌های قدرت و کیفیت توان سیستم‌های قدرت می‌باشد.

**رضا کیانی‌نژاد** مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه شهید چمران اهواز دریافت نموده پس از آن به مدت سه سال در کارخانجات مختلف فولاد سازی اهواز به عنوان مهندس برق مشغول به کار شد. در سال ۱۳۷۴ پس از اخذ کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس، به عنوان عضو هیأت علمی در گروه برق دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول به کار شد. در سال ۱۳۸۲ برای اخذ دکتری مهندسی برق به دانشگاه پیکاردی ژول-ورن در کشور فرانسه پیوست و در سال ۱۳۸۶ پس از دفاع از تز خود با عنوان کنترل ماشین‌های القایی شش فازه، مجدداً به دانشگاه شهید چمران اهواز پیوست و به عنوان استادیار گروه برق مشغول به کار شد. ایشان در سال ۱۳۹۵ و بنا به تمایل شخصی با مرتبه دانیاری از دانشگاه شهید چمران اهواز بازنشسته و به موسسه آموزش عالی غیر دولتی- غیر انتفاعی الکترونیکی برخط در اهواز ملحق شد. از ایشان حدود شصت مقاله در کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی و حدود بیست مقاله در مجلات بین‌المللی به چاپ رسیده است.

**محمد بهاری‌پور** در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی مکانیک خود را از دانشگاه صنعتی شاهرود و در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۸۶ الی ۱۳۹۷ به عنوان کارشناس مکانیک واحد نگهداری و تعمیرات کارخانه‌های گندله سازی و احیای مستقیم در شرکت فولاد خوزستان به کار مشغول بود و هم‌اکنون به عنوان سرپرست مکانیک واحد نگهداری و تعمیرات بخش احیا فولاد خوزستان مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند طراحی و تعمیرات توربوماشین‌ها، طراحی و تعمیرات سیستم‌های حمل مواد، طراحی تکاملی در مهندسی مکانیک، مدل‌سازی به روش باند گراف، ماشین‌های کنترل عددی، چاپ سه‌بعدی فلزات به روش لایه نشانی لیزری، طراحی سنسورهای نرم‌افزاری در خط تولید، کنترل هوشمند و رباتیک می‌باشد.

measurements," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1736-1746, Mar. 2020.

- [25] S. H. Mortazavi, Z. Moravej, and S. M. Shahrtash, "A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 34, no. 2, pp. 438-447, Apr. 2018.
- [26] F. M. Uriarte, *Modeling, Detection, and Localization of High-Impedance Faults in Low-Voltage Distribution Feeders*, M.Sc Thesis, Virginia Tech Polytechnic Institute, 2003.
- [27] H. Wu, *Study of High Impedance Fault Characteristics and Detection Methods*, M.Sc. Thesis, The University of New South Wales, Australia, 2015.
- [28] M. Adamiak, C. Wester, M. Thakur, and C. Jensen, *High Impedance Fault Detection on Distribution Feeders*, GE Industrial Solution, 2006.
- [29] M. Michalik, M. Lukowicz, W. Rebizant, S. J. Lee, and S. H. Kang, "Verification of the wavelet-based HIF detecting algorithm performance in solidly grounded MV networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2057-2064, Oct. 2007.
- [30] M. Michalik, M. Lukowicz, W. Rebizant, S. J. Lee, and S. H. Kang, "High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 4, pp. 1793-1802, Oct. 2006.
- [31] M. R. Haghighi, A. R. Sedighi, and O. P. Malik, "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection," *IET Proc. Gen. Trans. Dist.*, vol. 153, no. 3, pp. 359-367, May 2006.
- [32] A. Ghaderi, H. A. Mohammadpour, H. L. Ginn, and Y. J. Shin, "High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, pp. 1260-1268, Jun. 2015.
- [33] N. I. Elkalashy, et al., "Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks," *IEEE Trans. Dielect. Elec. Insu.*, vol. 14, no. 2, pp. 375-383, Apr. 2007.
- [34] M. Kizilcay and T. Pniok, "Digital simulation of fault arcs in power systems," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 1, no. 1, pp. 55-60, Feb. 1991.
- [35] A. Aljohani and I. Habiballah, "High-impedance fault diagnosis: a review," *Energies*, vol. 13, no. 23, Article No.: en13236447, 2020.
- [36] C. Ozansoy, "Performance analysis of skewness methods for asymmetry detection in high impedance faults," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 6, pp. 4952-4955, Nov. 2020.
- [37] <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>

[۳۸] س. ق. سیف‌السادات و همکاران، مطالعه و بررسی خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع برق ۳۳ کیلوولت اهواز و ساخت نمونه آزمایشگاهی رله تشخیص این خطا، شماره قرارداد طرح پژوهشی ۱۳۴۷۲/۵۵، شرکت توزیع نیروی برق اهواز، اهواز، ۱۳۹۲.

**مهدی منادی** مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه شهید چمران اهواز (سال ۱۳۷۹) و دانشگاه صنعتی شاهرود (سال ۱۳۸۳) دریافت نمود. وی همچنین دکتری خود را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه پلی تکنیک کاتالونیا کشور