

شناسایی تخلیه جزئی در کابل‌های قدرت با استفاده از تبدیل ویولت

بابک بدرزاده و سید محمد شهرتاش

انتشار کابل [۷] دقت چندانی ندارند. روش در محل کار خود به دو دسته تقسیم می‌شود. نوع اول آن غیر پیوسته بوده و مانند روش اول مبتنی بر ایجاد مصنوعی تخلیه جزئی است با این تفاوت که آزمایشها در محل کار کابل انجام می‌شوند، به این صورت که سیستم اندازه‌گیری به صورت سیار بوده و به محل کار کابل برده می‌شود. چنین آزمایشهایی به صورت دوره‌ای و غیر پیوسته صورت می‌گیرند و به دلیل ایجاد اغتشاش در ولتاژ و فرکانس کاری شبکه چندان مناسب نیستند. در روش پیوسته مورد نظر این مقاله اندازه‌گیری تنها با استفاده از سنسور و بدون نیاز به منبع ولتاژ صورت می‌گیرد. این سنسورها به سه دسته تقسیم می‌شوند [۸]:

سنسورهای القایی (مانند CTهای فرکانس بالا و پیچک روگوفسکی)، کوپلرهای خازنی یا ترکیبی از این دو نوع ترکیب دو سنسور دارای کلیه مزایای آنها بوده ولی از لحاظ قیمت گرانتر است. مشکل اساسی در اندازه‌گیری تخلیه جزئی (به ویژه اندازه‌گیری پیوسته) کوچک بودن سیگنال تخلیه جزئی است، بطوریکه ممکن است سیگنال کاملاً با نویز مخلوط شده و این امکان شناسایی را دشوار می‌سازد. با ارایه سیستمی به جهت کاهش یا حذف نویز موجود در سیگنال می‌توان در مورد وضعیت سیستم و نیاز به انجام عملیات حفاظتی تصمیم‌گیری نمود. به این معنا که چنانچه با حذف نویز موجود در سیگنال، پالسهای تخلیه جزئی مشاهده نشود، هیچ‌گونه عملیات حفاظتی نیاز نیست اما در صورتیکه پس از حذف نویز سطوح آشکار تخلیه جزئی مشاهده شود، باید در ابتدا شدت تخلیه جزئی را تشخیص داده و سپس به تناسب آن اقدام حفاظتی مناسب را اعمال نمود. به این عملیات شناسایی تخلیه جزئی اطلاق می‌شود بدین معنا که آیا در شبکه کابلی سطوح قابل اعتنای تخلیه جزئی وجود دارد یا خیر؟

روشهای کاهش نویز به دو دسته حلقه‌باز و حلقه‌بسته تقسیم می‌شوند [۱] و [۲]. در روشهای حلقه‌بسته به مرجع نویزی نیاز است تا نویز موجود در سیگنال تخلیه جزئی از طریق مقایسه بک آن حذف شود یا به تعبیر دیگر از یک آنتن الکترومغناطیسی خارجی به جهت اندازه‌گیری و کاهش نویز استفاده می‌شود. چنین آنتنی غالباً یک کوپلر سلفی یا خازنی است اما در روشهای حلقه‌باز نویز موجود در سیگنال تخلیه جزئی که توسط سنسور دریافت شده تنها با استفاده از فیلترهای آنالوگ یا دیجیتال حذف می‌شود. بدیهی است که روشهای حلقه‌باز به دلیل سرعت بیشتر برای حالت پیوسته بسیار مناسب هستند. امروزه با پیشرفت علم دیجیتال توجه به سمت استفاده از فیلترهای دیجیتال معطوف شده و از فیلترهای آنالوگ تنها در سیستمهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی استفاده می‌شود، برخی از این روشهای حلقه‌باز استفاده از فیلترهای وقتی [۹]، فیلترهای پیش‌بین خطی [۱۰]، متوسط‌گیری از پالس [۱۱]، هم‌بستگی و خودبستگی [۱۱]، تبدیل فوریه سریع و ویولت [۱] تا [۳] و [۱۲] تا [۲۲] هستند.

۲- سیستم اندازه‌گیری پیوسته تخلیه جزئی

نخستین گام مورد نیاز در طراحی سیستم اندازه‌گیری تخلیه جزئی دریافت سیگنال تخلیه جزئی در حین کار و بدون ایجاد وقفه در سیستم

چکیده: در این مقاله به شناسایی پیوسته پدیده تخلیه جزئی در کابل‌های قدرت پرداخته شده است. مشکل اساسی در اندازه‌گیری تخلیه جزئی کوچک بودن سیگنال است، بطوریکه ممکن است سیگنال کاملاً با نویز آمیخته شده و این امکان شناسایی را دشوار می‌سازد. به همین جهت اساسی‌ترین اقدام در شناسایی سیگنال تخلیه جزئی استفاده از الگوریتمهای کاهش نویز است که امروزه به این منظور غالباً از روشهای مبتنی بر پردازش سیگنال دیجیتال استفاده می‌شود. در این مقاله از الگوریتم نویززدایی مبتنی بر ویولت استفاده شده و در انتها نتایج حاصل از بکارگیری این الگوریتم با دو الگوریتم متداول دیگر (فیلتر پیش‌بین خطی و فیلتر LMS) مقایسه شده است. برخی از ملاحظات اساسی در نویززدایی به روش ویولت انتخاب مناسب سطوح تجزیه و ترکیب، تابع مادر، روش بسط سیگنال و روشهای تعیین مقادیر آستانه است که همگی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. به جهت اثبات کارایی الگوریتم از اطلاعات واقعی بدست آمده از آزمایشهای میدانی در یک شبکه کابلی ۱۱ کیلو ولتی استفاده شده است [۱] تا [۳].

کلید واژه: تبدیل ویولت، پردازش سیگنال دیجیتال، شناسایی پیوسته، تخلیه جزئی، کابل.

۱- مقدمه

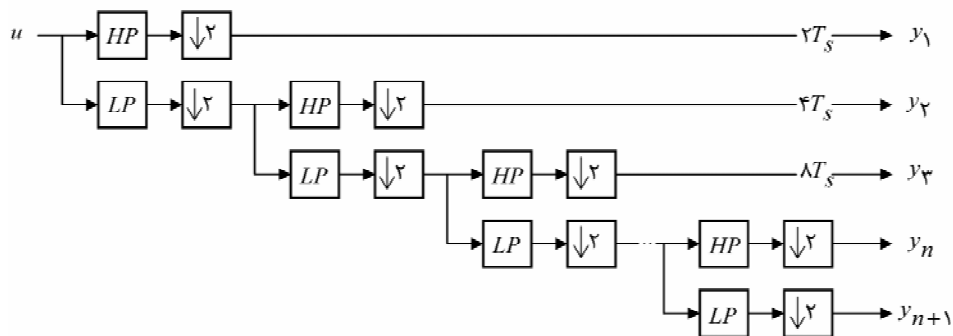
تخلیه جزئی در عایق کابل‌های قدرت در اثر عواملی مانند حفره‌ها، ترکها، آلودگیها و حمل و نقل نادرست حادث می‌شود [۴] تا [۶]. با هر بار بروز این پدیده ضخامت لایه عایقی کابل کمتر شده و در نتیجه عمر مفید کابل کاهش می‌یابد. در واقع کابل به مثابه یک سیستم حافظه‌دار عمل نموده که با هر بار بروز تخلیه جزئی مقداری از عمر مفید آن کاسته شده و در نهایت با افزایش تعداد دفعات بروز تخلیه جزئی و زایل شدن لایه عایقی کابل، شکست الکتریکی حادث می‌شود که موجب صدور فرمان قطع از سوی سیستم حفاظتی شبکه شده و بنابراین در امر برق‌رسانی به مشترکین به مدت چند دقیقه تا چند ساعت اختلال ایجاد می‌شود. بنابراین چنانچه بتوانیم پیش از گسترش خطا آنرا تشخیص داده و سپس اقدام پیشگیرانه متناسب را عملی سازیم، از لحاظ فنی و اقتصادی فواید فراوانی حاصل خواهد شد. روشهای اندازه‌گیری تخلیه جزئی به دو دسته در محل کار^۱ و خارج از محل کار^۲ تقسیم می‌شوند [۱]، [۲] و [۶]. در روشهای خارج از محل کار اندازه‌گیری تخلیه جزئی عمدتاً در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های کابل صورت می‌گیرد. این روشها عمدتاً به منظور اطمینان از صحت کابل‌های نو انجام می‌شود و در مورد کابل‌های کهنه در حال کار به دلیل در نظر نگرفتن برخی شرایط واقعی از قبیل نویز و ضریب تضعیف

این مقاله در تاریخ ۲ مرداد ماه ۱۳۸۱ دریافت و در تاریخ ۲۳ دی ماه ۱۳۸۱ بازنگری شد.

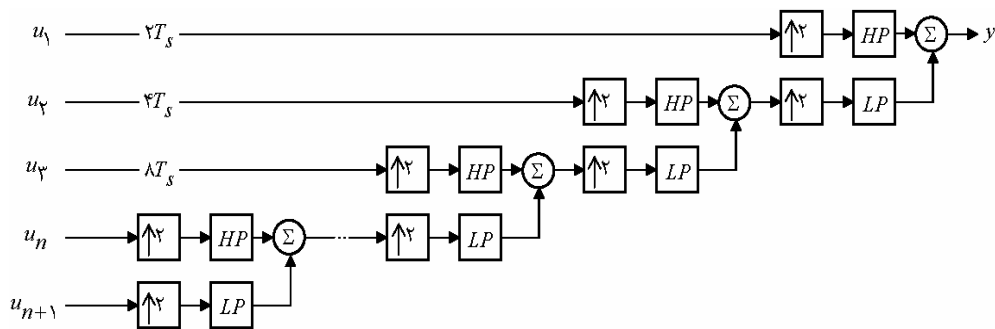
بابک بدرزاده، دانشکده مهندسی، دانشگاه Schoolhill, Robert Gordon, AB10 1FR (email: b.badrzadeh@rgu.ac.uk).

سید محمد شهرتاش، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک، کد پستی ۱۶۸۴۴ (email: Sm1357@iust.ac.ir).

1. On-line
2. On-site
3. Off-site



شکل ۱: تجزیه سیگنال به کمک ویولت.



شکل ۲: بازسازی سیگنال به کمک ویولت.

می‌شود. در نتیجه اجزا سیستم اندازه‌گیری پیوسته تخلیه جزئی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. سنسور
۲. تقویت کننده
۳. فیلتر بالاگذر
۴. مبدل آنالوگ به دیجیتال
۵. کابل رابط
۶. پردازنده سیگنال دیجیتال

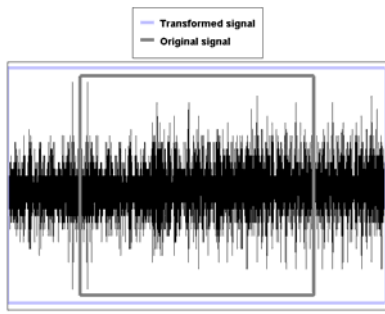
۳- سیستم اندازه‌گیری پیوسته تخلیه جزئی

۳-۱ روشهای تحلیل سیگنال تخلیه جزئی

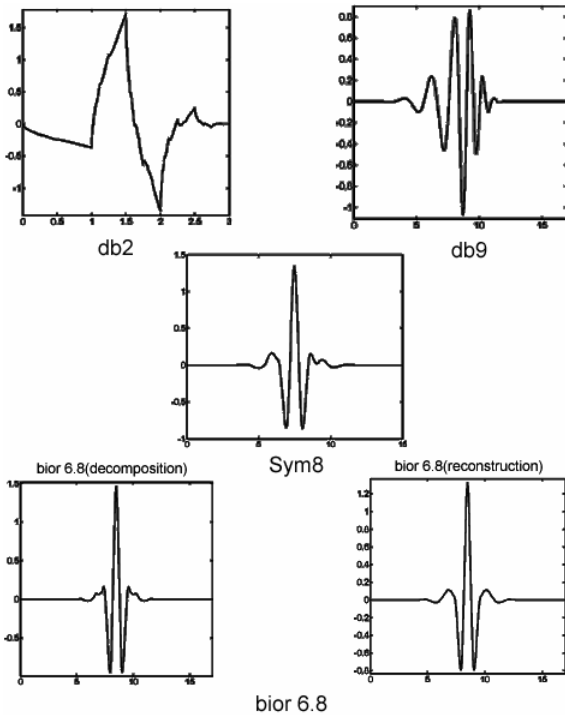
یکی از مهمترین روشهای تحلیل سیگنال روش فوریه و خانواده آن است. در این روش سیگنال اولیه به مولفه‌هایی با فرکانسهای متفاوت تجزیه می‌شود. به عبارت دیگر این روش اطلاعات را از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال می‌دهد. ایراد عمده این روش از دست رفتن اطلاعات حوزه زمان به هنگام انتقال به حوزه فرکانس است. در نتیجه قادر به تعیین زمان وقوع یک پدیده نخواهیم بود، چنین ایرادی به ویژه در سیگنالهای ناپایستان^۱ مانند سیگنال تخلیه جزئی بسیار مهم است. برای رفع این نقیصه از روش تحلیل ویولت استفاده می‌شود. تبدیل ویولت یک تبدیل زمان-مقیاس است و اطلاعات هر دو حوزه زمان و فرکانس را حفظ می‌کند. مشابه تبدیل فوریه تبدیل ویولت نیز بر دو نوع پیوسته (CWT)^۲ و گسسته (DWT)^۳ است. در اینجا نیز به دلیل زمان زیاد به جهت محاسبه ضرایب CWT در کاربردهای کامپیوتری از DWT استفاده می‌شود تعریف DWT به قرار زیر است [۳]:

است. به این منظور از سنسور (کوپلر) سلفی، خازنی یا ترکیبی از آن دو استفاده می‌شود. سنسور مورد استفاده بر روی غشای خارجی کابل و به گونه‌ای قرار می‌گیرد که تأثیری بر مشخصات عایقی کابل نداشته باشد. انتخاب نوع سنسور بستگی به پهنای باند نویز و نیز کمیت دلخواه (ولتاژ، جریان یا بار) دارد به گونه‌ایکه در فرکانسهای کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز از سنسور سلفی و تا ۳۰۰ مگاهرتز می‌توان از سنسور خازنی استفاده کرد. همچنین سنسور ترکیبی بازه گسترده‌ای از فرکانسها را تحت پوشش قرار می‌دهد. غالباً از سیگنال جریان نمونه‌برداری شده ولی چون در اکثر موارد سیگنال ولتاژ تخلیه جزئی مطلوب است به جای استفاده از CTهای متداول در حفاظت سیستمهای قدرت از پیچک روگوفسکی استفاده می‌شود. این مبدل، جریان توالی صفر کابل را اندازه‌گیری کرده و با تغییراتی سیگنال ولتاژ نشان دهنده تخلیه جزئی را آشکار می‌سازد. مزیت دیگر این پیچک عدم اشباع در فرکانسهای بالاست. سیگنال خروجی سنسور به دلیل کوچک بودن به وسیله یک تقویت‌کننده آنالوگ که معمولاً دارای بهره‌ای بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ (۳۰ تا ۶۰ دسیبل) است، تقویت می‌شود. از آنجا که جریان بار و هارمونیکهای آن بسیار بیشتر از جریان تخلیه جزئی است و این امر می‌تواند شناسایی را بسیار دشوار سازد، از یک فیلتر بالاگذر (عموماً فیلتر Butterworth با درجه ۲ به بالا) به جهت حذف جریان بار و کلیه هارمونیکهای آن استفاده می‌شود. فرکانس قطع این فیلتر در حدود ۱۰ کیلو هرتز تنظیم می‌شود تا قادر به حذف کلیه هارمونیکها باشد. سیگنالی که در این مرحله بدست آمده از طریق یک کابل رابط وارد کامپیوتر شده و عملیات پردازش سیگنال دیجیتال بر روی آن صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به اینکه سیگنال آنالوگ است باید با استفاده از یک مبدل A/D آنرا به سیگنال دیجیتال تبدیل کرد. شایان ذکر است که بلوک A/D خود متشکل از چندین بلوک است که به جهت اختصار از ذکر جزئیات مربوط به آن اجتناب شده است. در اندازه‌گیری تخلیه جزئی غالباً از یک مبدل A/D با قابلیت تفکیک ۸ بیت استفاده

1. Non-Stationary
2. Continuous Wavelet Transform
3. Discrete Wavelet Transform



شکل ۵: الگوریتم بسط به روش متقارن سازی.



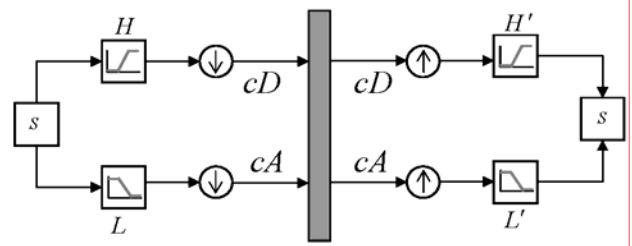
شکل ۶: برخی از توابع مادر مورد استفاده در نویز زدایی.

$$\begin{aligned}
 y_{HP}[k] &= \sum_m u[m]g[\gamma k - m] \\
 y_{LP}[k] &= \sum_m u[m]h[\gamma k - m]
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

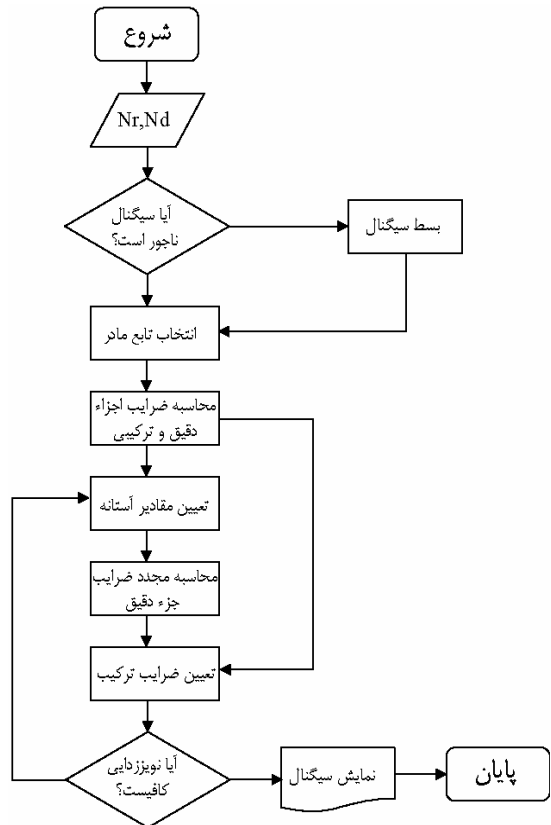
پس از تجزیه سیگنال عملیات لازم به جهت بازسازی سیگنال بدون از دست رفتن برخی از اطلاعات انجام می‌شود که به این بخش بازسازی یا ترکیب سیگنال به کمک ویولت اطلاق می‌شود. فرآیند لازم به جهت بازسازی سیگنال، معکوس تبدیل ویولت گسسته (IDWT) نام دارد. در این حالت به جای کاهش نمونه‌ها بین هر دو نمونه متوالی صفرهایی زیاد شده تا تعداد نمونه‌های سیگنال اصلی و سیگنالهای فیلتر شده در مجموع برابر شوند. شکل ۲ شمای ساده‌ای از فرآیند بازسازی سیگنال را نشان می‌دهد. در این حالت خروجی (سیگنال بازسازی شده) با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$u[m] = \sum_k \{y_{HP}(k).g[\gamma k - m] + y_{LP}(k).h[\gamma k - m]\} \quad (3)$$

همچنین به مجموعه فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذری که در مراحل تجزیه و بازسازی سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرند، فیلترهای آینه‌ای چهارگانه [۳] می‌گویند که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



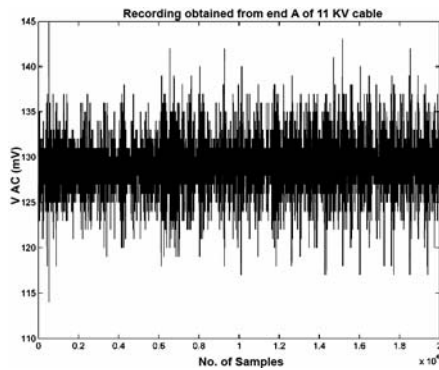
شکل ۳: فیلترهای آینه‌ای چهارگانه.



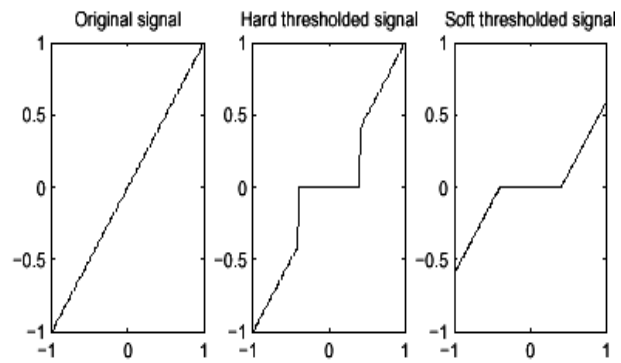
شکل ۴: فلوجارت نویز زدایی (شناسایی تخلیه جزئی) بوسیله ویولت.

$$DWT(m, n) = \sum_k (a^m)^{-\gamma/2} f(k) \psi((n - ka^m) / a^m) \quad (1)$$

که در آن $f(k)$ و $\psi(k)$ به ترتیب سیگنال اولیه و تابع ویولت بوده و نیز a^m و ka^m به ترتیب ثابت انتقال و مقیاس نامیده می‌شوند. شکل ۱ شمای ساده‌ای از فرآیند ایجاد DWT را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است سیگنال (S) توسط فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر به دو جزء تفکیک می‌شود. یکی جزء تقریبی و دیگری جزء دقیق که به ترتیب حاصل عبور سیگنال از مجموعه‌ای از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر هستند (در واقع توابع g و h پاسخ ضربه فیلترهای فوق‌الذکر هستند). مشکلی که در اینجا وجود دارد این است که اگر سیگنال S مثلاً متشکل از ۱۰۰۰ نمونه باشد، هر یک از اجزا A و D نیز دارای ۱۰۰۰ نمونه خواهند بود و در نتیجه تعداد کل نمونه‌هایی که پردازش می‌شوند، دو برابر خواهد شد. برای رفع این مشکل تعداد نمونه‌های خروجی‌های هر یک از فیلترها در هر مرحله تقسیم بر دو می‌شوند و در نتیجه کل نمونه‌های سیگنال تجزیه شده برابر سیگنال اصلی خواهد بود. به این عملیات تجزیه یا تحلیل سیگنال به کمک ویولت اطلاق می‌شود و خروجیهای فیلترهای بالا و پایین‌گذر با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود [۲۳]:



شکل ۸: سیگنال تخلیه جزئی پردازش نشده.



شکل ۹: مقادیر آستانه سخت و نرم.

ج: انتخاب تابع ویولت

تابع ویولت که به آن تابع مادر نیز گفته می‌شود سیگنال گذرای نوسانی است که انتگرال آن در کل بازه زمانی صفر است [۲]. در انتخاب تابع مادر باید به این نکته توجه داشت که تابع انتخابی بیشترین شباهت را با سیگنال تخلیه جزئی داشته باشد تا بهترین نویزدایی به عمل آید. برخی از توابع مادر مورد استفاده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند [۲۴]. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که در کلیه توابع مادر سطوح تجزیه و ترکیب یکسان بوده در حالیکه در توابع bior این وضع برقرار نیست مثلاً bior 6.8 معرف این است که تجزیه و ترکیب به ترتیب با ۸ و ۶ سطح صورت گرفته‌اند که در انتهای شکل ۶ مشخص شده است. در مورد برتری یکی از این توابع نمی‌توان اظهار نظر نمود، مثلاً در [۲] تابع db2 تابع مادر انتخابی است، در حالیکه در [۲۵] نشان داده می‌شود که توابع bior 6.8 و sym8 بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند یا به تعبیر دیگر می‌توان اذعان داشت که هر چه شکل تابع مادر به شکل سیگنال تخلیه جزئی نزدیک‌تر باشد، نسبت سیگنال به نویز بیشتری حاصل خواهد شد و در حال حاضر این بهترین معیار برای تعیین تابع مادر بهینه است. همچنین شایان ذکر است که توابع فوق تحلیلی نبوده و به صورت نقطه به نقطه بیان می‌شوند.

د: محاسبه ضرایب ناشی از تجزیه سیگنال در هر یک از سطوح

اهمیت این مرحله در آن است که با توجه به اشکال مربوط به ضرایب ویولت در هر یک از سطوح تجزیه به راحتی می‌توان مقادیر آستانه مناسب را تعیین نمود. یعنی بسته به بزرگ یا کوچک بودن آنها در هر یک از سطوح می‌توان به سهولت مقادیر آستانه مناسب را انتخاب کرد.

ه: تعیین نوع و روش محاسبه مقادیر آستانه

یکی از مهمترین راههای کاهش نویز در روش ویولت استفاده از مقادیر آستانه‌ای و سنجیدن ضرایب سطوح مختلف با این مقادیر آستانه است. بسته به نیاز این مقادیر آستانه‌ای برای سطوح مختلف ممکن است یکسان یا متفاوت باشند، لیکن استفاده از مقادیر متفاوت تاثیر بهتری دارد، مثلاً چنانچه عمل تجزیه در n سطح صورت گیرد برای هر یک از ضرایب جزء دقیق به یک مقدار آستانه نیاز داریم، یعنی اگر ضرایب جزء دقیق از D_1 تا D_n شماره‌گذاری شوند به n مقدار آستانه که از λ_1 تا λ_n شماره‌گذاری می‌شوند، نیاز است، در حالیکه در مرحله بازسازی (ترکیب) برای هر یک از ضرایب اجزا دقیق و تقریبی به این n مقدار آستانه نیاز است. شایان ذکر است که تا کنون روشهایی به جهت تعیین عددی مقادیر آستانه پیشنهاد شده [۲۴] ولی در صورت بکارگیری آنها حداقل آستانه مناسب و نه آستانه بهینه حاصل شده و در نتیجه برای حصول به

۳-۲ نویزدایی با استفاده از ویولت

الگوریتم کاهش یا حذف نویز موجود در سیگنال با استفاده از تبدیل ویولت به قرار زیر است:

الف: انتخاب تعداد سطوح تجزیه و ترکیب

ب: بسط سیگنال در صورت ناچور بودن تعداد نمونه‌ها

ج: انتخاب تابع ویولت

د: محاسبه ضرایب ناشی از تجزیه سیگنال در هر یک از سطوح براساس رابطه (۲)

ه: تعیین نوع آستانه

و: محاسبه ضرایب ناشی از ترکیب سیگنال

شکل ۴ فلوجارت لازم برای شناسایی تخلیه جزئی به روش ویولت را نشان می‌دهد.

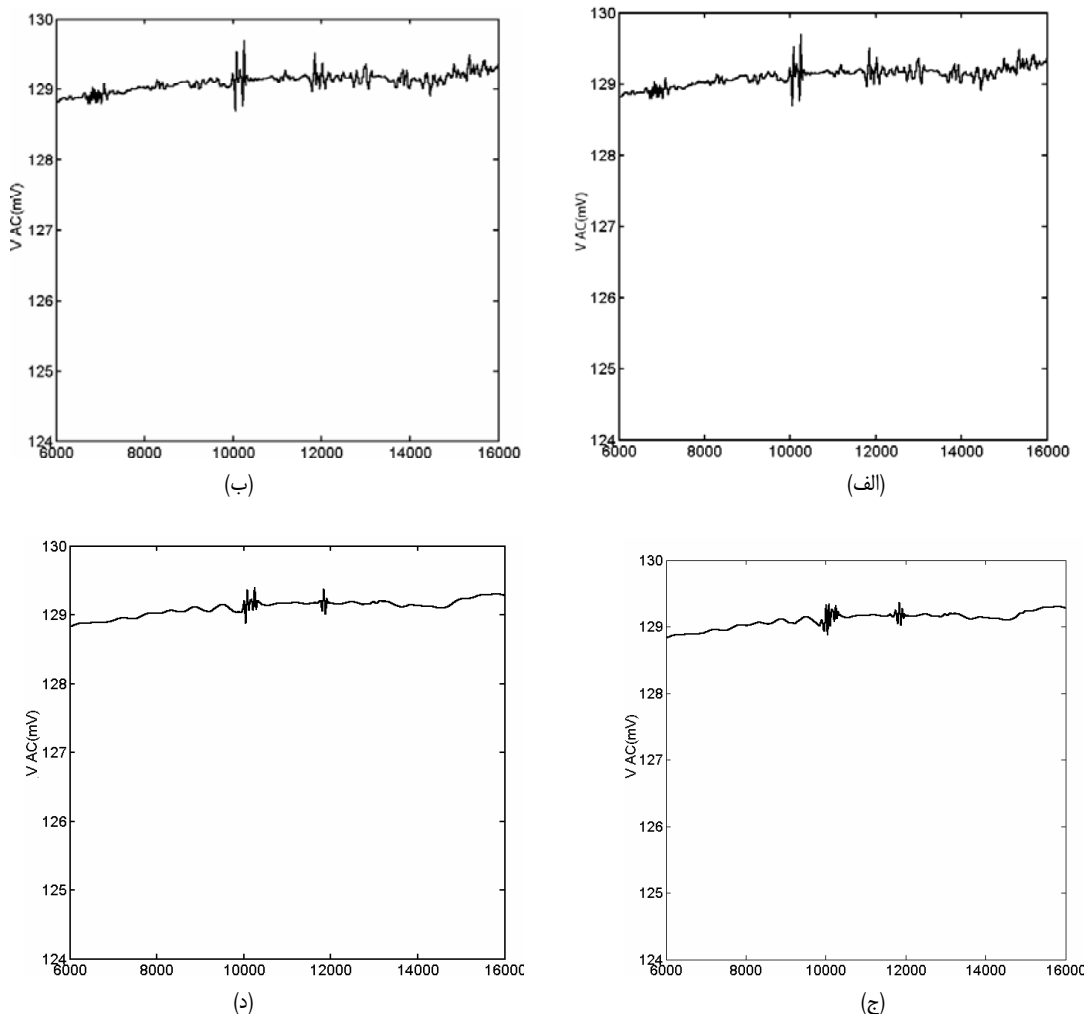
حال به تشریح هر یک از مراحل (الف) تا (و) می‌پردازیم:

الف: انتخاب تعداد سطوح تجزیه و ترکیب

هر جفت از فیلترهای بالا و پایین‌گذر در شکل‌های ۱ و ۲ یک سطح تجزیه یا ترکیب را تشکیل می‌دهند. هرچه تعداد سطوح بیشتر باشد دقت عملیات بالاتر خواهد رفت اما در مقابل ممکن است زمان زیادی به طول بیانجامد. غالباً تعداد سطوح تجزیه و ترکیب بین ۵ تا ۸ انتخاب می‌شوند.

ب: بسط سیگنال

یکی از مشکلاتی که ممکن است در پردازش سیگنال با استفاده از ویولت پیش بیاید، ناچور بودن تعداد نمونه‌ها به هنگام عمل تجزیه سیگنال است، به عنوان یک قاعده باید در نظر داشت که حاصل تقسیم تعداد نمونه برداشته شده از سیگنال بر مقیاس (مقیاس برابر با ۲ به توان تعداد سطوح تعریف می‌شود) عدد صحیح باشد [۲۴]، مثلاً چنانچه سیگنال دارای ۲۰۰۰۰ نمونه باشد تجزیه سیگنال به راحتی تا سطح پنجم امکان‌پذیر است، چرا که حاصل عبارت $20000 \div 25 = 800$ عدد صحیح ۸۰۰ است، اما چنانچه بخواهیم تعداد سطوح تجزیه سیگنال را به ۶ برسانیم، این تعداد نمونه جوابگو نیست چرا که حاصل عبارت $20000 \div 26 = 769.23$ عدد غیر صحیح ۳۱۲/۵ است. در نتیجه در این حالت باید تعداد نمونه‌ها را به نزدیک‌ترین عددی که بزرگتر از تعداد نمونه‌ها بوده و از حاصل تقسیم آن بر مقیاس یک عدد صحیح حاصل می‌شود، افزایش داد (۲۰۰۳۲). شایان ذکر است که در صورت ناچور بودن تعداد نمونه‌ها عمل بسط سیگنال در کلیه سطوح تجزیه الزامی است. تاکنون الگوریتم‌های زیادی به جهت بسط سیگنال پیشنهاد شده [۲۴] که در این مقاله از الگوریتم مقارن سازی که بهترین تقریب از سیگنال اولیه را ارائه داده و هیچ ناپیوستگی نیز ایجاد نمی‌کند بهره می‌گیریم (شکل ۵).



شکل ۹: (الف) نویزدایی با استفاده از bior 6.8، (ب) نویزدایی با استفاده از db2، (ج) نویزدایی با استفاده از db9، (د) نویزدایی با استفاده از sym 8.

نویزدایی کامل از روش سعی و خطا به جهت تعیین مقادیر آستانه استفاده شده است.

به طور کلی روشهای آستانه‌گذاری به دو نوع نرم و سخت تقسیم می‌شوند. شکل ۷ این دو روش آستانه‌گذاری را به ازای سیگنال $(S = X)$ نشان می‌دهد [۲۴]. با توجه به شکل می‌توان بیان ریاضی این دو روش را به صورت زیر نوشت [۲]:

و: محاسبه ضرایب ناشی از ترکیب سیگنال
در این مرحله با استفاده از ضریب جزء تقریبی در سطح n ام و ضرایب جزء دقیق اصلاح شده (در اثر اعمال مقادیر آستانه) در هر یک از سطوح با استفاده از رابطه (۳) سیگنال اولیه پس از نویزدایی بازسازی می‌شود.

روش آستانه سخت:

$$(۴) \text{ اگر } \lambda > |X(t)| \text{ در غیر این صورت } \delta_{\lambda}^H = 0$$

روش آستانه نرم:

$$(۵) \text{ اگر } \lambda > |X(t)| \text{ در غیر این صورت } \delta_{\lambda}^S = \text{SGN}((X(t)(X(t) - \lambda))$$

$$\delta_{\lambda}^S = 0$$

که در آن عملگر SGN بیانگر تابع علامت بوده که از رابطه زیر بدست می‌آید:

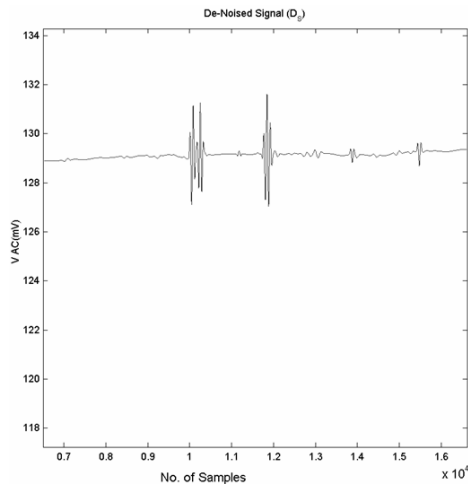
$$(۶) \text{SGN}(t) = 1/2(1 + u(t))$$

۴- نتایج

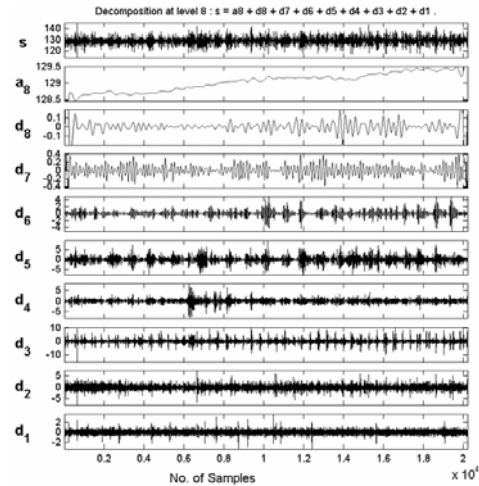
شکل ۸ نمونه‌ای از سیگنال تخلیه جزئی را که دارای مقدار زیادی نویز است نشان می‌دهد. این سیگنال مربوط به ابتدای یک کابل ۱۱ کیلو ولت، ۱۴۰۰ متری با سه هادی است. تعداد نمونه‌های مورد استفاده ۲۰۰۰۰ و فرکانس نمونه‌برداری ۲۵ مگاهرتز است. در ابتدا تعداد سطوح تجزیه را ۸ در نظر می‌گیریم. با توجه به تعداد نمونه‌ها مشخص است که از سطح ششم به بعد سیگنال ناچور شده و باید آنرا بسط داد که نحوه بسط در شکل ۵ مشخص شده است.

به جهت انتخاب تابع مادر هیچ روش تحلیلی وجود نداشته و صرفاً به روش سعی و خطا و از آزمودن توابع مادر بر سیگنال مورد نظر تابع مادر بهینه را می‌یابیم. شکل ۹ نتایج حاصل از تاثیر چهار تابع db2، db9، sym8 و bior6.8 را نشان می‌دهد (به جهت وضوح بیشتر سیگنالها باز شده‌اند). همان طور که ذکر شد تعداد سطوح تجزیه همواره ۸ در نظر گرفته شده در حالیکه تعداد سطوح ترکیب در bior 6.8 ۶ و در سایرین ۸

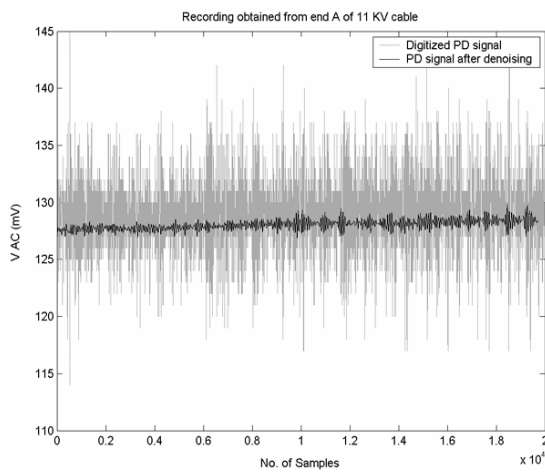
در واقع در روش سخت ضرایبی که مقدار قدر مطلق آنها کمتر از مقدار آستانه است، برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند، در حالیکه روش نرم تعمیم یافته روش سخت است به این معنا که در این روش ابتدا ضرایبی که مقدار قدر مطلقشان کمتر از مقدار آستانه است، برابر صفر در نظر گرفته شده و سپس سایر ضرایب غیر صفر حول نقطه صفر کشیده می‌شوند. همانطور که مشخص است در روش سخت دو ناپیوستگی در نقاط



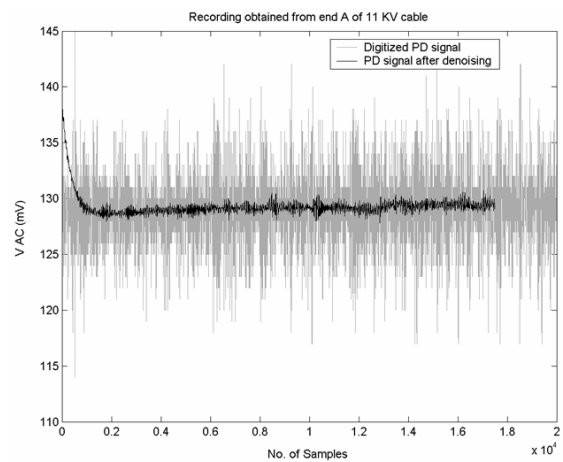
شکل ۱۱: نویززدایی با استفاده از آستانه سخت.



شکل ۱۰: تجزیه سیگنال به اجزاء دقیق و تقریبی.



شکل ۱۳: شناسایی با استفاده از فیلتر LMS.



شکل ۱۲: شناسایی با استفاده از فیلتر پیش‌بین.

می‌شود [۲]. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۵۰ مگاهرتزی و نیز با توجه به قضیه نمونه برداری نایکوئیست محدوده فرکانسی سطوح اول، دوم و سوم به ترتیب ۲۵-۱۲/۵، ۱۲/۵-۶/۲۵ و ۶/۲۵-۳/۱۲۵ است. نویزهای ناشی از ایستگاههای رادیویی، تلویزیونی و تلفنهای سیار عموماً در محدوده چنین فرکانسهایی هستند و بنابراین به هنگام نویززدایی به جهت تسریع محاسبات می‌توان ضرایب تبدیل ویولت مربوط به این سطوح را برابر صفر قرار داد، مثلاً در شبکه توزیع سیگنال تخلیه جزئی دارای فرکانسی در محدوده ۳۰-۱۰ مگاهرتز است، در حالیکه نویزهای رادیویی AM و FM به ترتیب دارای سطوح فرکانسی بین ۱۰-۰ و ۱۰۰-۹۰ مگاهرتز بوده و به سهولت حذف می‌گردند، همچنین گرچه نویز متناوب ناشی از ماشینهای الکتریکی در بازه فرکانسی ۵۰-۰ مگاهرتز قرار می‌گیرد، اما از سوی دیگر در این گونه نویزها مولفه‌های فرکانسی بزرگ سریعاً تضعیف شده و با سطح فرکانسی تخلیه جزئی تداخلی ایجاد نمی‌کنند و در نتیجه چنین نویزهایی با وجود شباهت نسبی با سیگنال تخلیه جزئی تا اندازه مناسبی حذف می‌شوند. در نتیجه با کمی دقت متوجه می‌شویم که تنها ضرایب سطوح ۷ و ۸ شکلی مشابه سیگنال تخلیه جزئی داشته و بنابراین می‌توان از سایر ضرایب نیز صرف نظر کرد چرا که بازه فرکانسی سطوح اولیه مطابق با بازه فرکانسی نویزهای موجود بوده و طبیعی است این سطوح پس از آستانه‌گذاری و حذف هیچ نقشی در ایجاد تخلیه جزئی ندارند. بنابراین پس از نویززدایی تنها سطوح ۷ و ۸ برجای می‌مانند و می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال تخلیه جزئی دارای

در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکلها مشخص است که بهترین نویززدایی در صورت اعمال تابع bior 6.8 بدست می‌آید. به جهت تعیین مقادیر آستانه مناسب ابتدا باید مقدار ضرایب تجزیه در هر یک از سطوح را دانست که در شکل ۱۰ مشخص شده است. با توجه به شکل مشخص است که در سطوح هفتم و هشتم سیگنال بدست آمده شباهت بیشتری با سیگنال تخلیه جزئی داشته و بنابراین به جهت حفظ خصوصیات سیگنال لازم است از مقادیر کوچک به جهت آستانه‌گذاری استفاده شود. در حالیکه در سایر سطوح، سیگنال شدیداً آغشته به نویز بوده و انتخاب مقادیر آستانه بزرگ الزامی است. از سوی دیگر باید به خاطر داشت که ضریب جزء تقریبی کمک چندانی به اظهار نظر در مورد تخلیه جزئی در کابل نمی‌کند و صرفاً از اشکال مربوط به ضرایب جزء دقیق ($d_1 - d_8$) به جهت تعیین مقادیر آستانه و به دنبال آن کاهش نویز موجود در سیگنال استفاده می‌کنیم.

غالباً پیشنهاد می‌شود که برای حصول به آستانه بهینه به ازای یک سطح تجزیه خاص، آستانه برابر با مقدار قدر مطلق بیشترین دامنه نویز اندازه‌گیری شده در آن سطح تنظیم شود [۲۳]. چنین آستانه‌ای لزوماً آستانه بهینه است، چرا که به ازای آستانه کمتر از این مقدار هنوز مقداری نویز در سیگنال باقی مانده و به ازای آستانه بیشتر از این مقدار برخی از خصوصیات ماهوی سیگنال از بین رفته و در واقع چنین سیگنالی دیگر سیگنال تخلیه جزئی نخواهد بود، اما در اینجا به جهت عدم امکان اندازه‌گیری نویز از روش سعی و خطا برای تنظیم مقادیر آستانه استفاده

- [6] B. Oyegoke, P. Hyvinen, and M. Aro, "Partial discharge measurement as diagnostic tool for power cable systems," Helsinki University of Technology, High Voltage Institute, Report *TKK-SJT-45*, 2001.
- [7] S. Boggs, A. Pathak, and P. Walker, "Partial discharge XXII: High frequency attenuation in shielded solid dielectric power cable and implications thereof for PD location," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 9-16, Jan./Feb. 1996.
- [8] D. Pommerenke, T. Strehl, R. Heinrich, W. Kalkner, F. Schmidt, and W. Weibenberg, "Discrimination between PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 814-824, Dec. 1999.
- [9] U. Schichler, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Application of digital filter for on-site partial discharge detection on high voltage cables," in *Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Brisbane, Australia, Jul. 1994.
- [10] H. Borsi, "Digital location of partial discharges in HV cables," *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 28-36, Feb. 1992.
- [11] J. P. Steiner and P. H. Reynolds, "Estimating the location of partial discharges in cables," *IEEE Trans on Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 44-59, Feb. 1992.
- [12] W. Xiaorang, G. Zungjun, S. Yong, and Y. Zhang, "Extraction of partial discharge pulse via wavelet shrinkage," in *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 2, pp. 685-688, China, Jun. 2000.
- [13] Y. Yasuda, J. Matsura, T. Hara, and C. Min, "Application of FWT (Fast Wavelet Transform) for auto-detection system of partial discharge in power cables," *IEE High Voltage Engineering Symposium*, Aug. 1999.
- [14] E. Carminati and M. Lazzaroni, "Analysis of PD signal by wavelet transform," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, vol. 2, pp. 1081-1085, 2000.
- [15] H. Mingyou, H. Xie, T. Tiong, and X. Wu, "Study on a spatially selective noise filtration technique for suppressing noises in partial discharge on-line monitoring," in *Proc. 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Jun. 2000.
- [16] K. Arii, M. Shibahara, and M. Fujii, "Separation of noise from partial discharge signal by using wavelet," in *Proc. IEEE 5th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Seoul, Korea, May 1997.
- [17] X. Shuzhen and Z. Z. Chenchen, "Application of signal-adapted wavelet to detection of PD," in *Proc IEEE. 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 757-760, China, Jun. 2000.
- [18] X. D. Ma, C. Zhou, and L. J. Kemp, "DSP based partial discharge characterization by wavelet analysis," in *Proc. IEEE 19th Int. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuums*, pp. 780-784, 2000.
- [19] X. D. Ma, C. Zhou, and L. J. Kemp, "Investigation into the use of wavelet theory for partial discharge pulse extraction in electrically noisy environment," in *Proc. IEEE Dielectric Materials, Measurements and Application*, pp. 123-126, 2000.
- [20] Y. Quan, N. Gao, and G. Zhang, Z. Yan, "Wavelet transform in partial discharge measurement," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation*, pp. 428-431, Virginia, US, Jun. 1998.
- [21] J. K. Jnag, S. H. Kim, and Y. S. Lee, J. H. Kim, "Classification of partial discharge electrical signal using wavelet transform," in *Proc. IEEE 13th Int. Conf. on Dielectric Materials*, pp. 552-555, Nira, Japan, Jun. 1999.
- [22] X. D. Ma, C. Zhou, and L. J. Kemp, "Interpretation of wavelet Detection and its application in Partial Discharge Detection," *IEEE Trans. on Dielectric Elec. Insul.*, vol. 9, no. 3, pp. 446-457, Jun. 2002.
- [23] E. Tungkanawanich, Y. Hamid, Z-L. Kawasaki, and K. Matsuura, "Analysis of VHF-wideband electromagnetic noises from partial discharge using discrete wavelet transform," *IEEE PES Winter Meeting*, vol. 1, pp. 263-268, 2001.
- [24] Wavelet Toolbox for Using with MATLAB, Mathworks® Inc., 2000.
- [۲۵] بابک بدرزاده، شناسایی و مکان‌یابی تخلیه جزئی در کابل‌های قدرت با استفاده از فیلترهای وقتی و تبدیل ویولت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۸۱.

فرکانسی نزدیک به فرکانس این سطوح است. غالباً می‌توان به جهت اطمینان از صحت کار سیگنال بدست آمده را با ضریب جزء دقیق در آخرین سطح (در اینجا d_8) مقایسه نمود که باید اشکال تقریباً مشابهی داشته باشند.

همچنین شکل ۱۱ نويززدایی با استفاده از تابع $\text{bior } 6.8$ اما با آستانه‌گذاری سخت را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود روش آستانه نرم (شکل ۹-الف) نسبت به آستانه سخت قابلیت بیشتری نشان می‌دهد.

از مقایسه سیگنال نويززدایی شده بوسیله ویولت (شکل ۹) با سیگنال نويززدایی شده بوسیله دو فیلتر وقتی (فیلتر پیش‌بین خطی و فیلتر LMS) [۲۶] در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در می‌یابیم که کارایی ویولت در نويززدایی بسیار بیشتر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به اندازه‌گیری پیوسته تخلیه جزئی در کابل‌های قدرت پرداخته شده است. مزیت عمده اندازه‌گیری پیوسته حفظ برقرار بودن تجهیزات و نیاز به هزینه‌های کمتر به جهت انجام آزمایش است. در این صورت قادر خواهیم بود که بر وضعیت سیستم در هر لحظه نظارت کنیم و در نتیجه تصمیم‌گیری به جهت برنامه‌ریزی در سیستم و انجام اقدامات پیشگیرانه به راحتی میسر خواهد شد. اساسی‌ترین گام در شناسایی تخلیه جزئی کاهش یا حذف نویز آمیخته با سیگنال با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال است. در مقام مقایسه تبدیل ویولت و فیلترهای وقتی می‌توان اذعان داشت که تبدیل ویولت کاملاً قادر به جداسازی پالس‌های منفصل تخلیه جزئی بوده و هیچ گونه نویزی برجای نمی‌گذارد، در حالیکه در صورت شناسایی به وسیله فیلترهای وقتی هنوز نویزهای کم دامنه‌ای برجای می‌مانند. به عبارت دیگر تبدیل ویولت هم شکل و هم دامنه سیگنال تخلیه جزئی را به درستی حفظ کرده، در حالیکه فیلترهای وقتی علی‌رغم حفظ دامنه، شکل سیگنال را به طور کامل حفظ نمی‌کنند. این مساله به ویژه در صورت نیاز به محاسبه بار الکتریکی که مستلزم محاسبه انتگرال زیر سطح منحنی است، مشکل‌آفرین خواهد بود. از سوی دیگر همان طور که ذکر شد، تعیین تابع مادر در این مقاله سایر مراجع به صورت سعی و خطا صورت گرفته است. در نتیجه مولفان در تحقیقات آتی به دنبال یافتن روشی جهت تعیین خودکار توابع مادر می‌باشند.

مراجع

- [1] I. Shim, J. J. Soraghan, and W. H. Siew "Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: An Overview," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 6-12, May/June. 2000.
- [2] I. Shim, J. J. Soraghan, and W. H. Siew, "Detection of PD utilizing digital signal processing methods, part3: open loop noise reduction," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 1, pp 6-13, Jan./Feb. 2001.
- [3] I. Shim, J. J. Soraghan, W. H. Siew, F. McPherson, and K. Sludden, "Robust partial discharge measurement in MV cable networks using discrete wavelet transform," *IEEE Power Engineering Society Winter meeting*, vol. 1, pp. 718-723, 2000.
- [4] R. Bartnikas and K. D. Srivastava, *Power and Communication Cables, Theory and Applications*, Wiley, 2000.
- [5] R. Villefrance, *Mobile System for Assessment of AC High Voltage Cables*, Ph. D. thesis, Technical University of Denmark, Feb. 2000.

سید محمد شهرتاش مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه آبادان دریافت کرد و در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه UMIST انگلستان اخذ نمود. ایشان مدرک دکترای مهندسی برق خود را در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه صنعتی شریف ایران دریافت کرد. نامبرده از سال ۱۳۶۵ تاکنون عضو هیات علمی دانشگاه علم و صنعت ایران و از سال ۱۳۸۰ تاکنون ریاست دانشگاه را بر عهده دارد. زمینه‌های مورد علاقه وی عبارتند از حفاظت سیستمهای قدرت، حالت‌های گذرا در سیستمهای قدرت و پستهای فشار قوی است.

بابک بدرزاده تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سالهای ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم‌اکنون در حال گذراندن دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه RGU انگلستان می‌باشد نامبرده از سال ۷۶ الی ۸۱ در شرکتهای مختلف صنعتی مشغول بکار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کاربرد پردازش سیگنال دیجیتال در سیستمهای قدرت، پایداری و کنترل سیستمهای قدرت، حفاظت سیستمهای قدرت و پستهای فشار قوی.