

نویززدایی از سیگنال صوتی تخلیه جزئی بوسیله

تبدیل موجک مختلط دو درختی

محسن قراط^۱، اعظم لایقی^۲ و مهدی غفاری^۲ مریم السادات اخوان حجازی^۳، گئورگ قره پتیان^۱، حمید لطیفی^۲

^۱ دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر mohghoco@yahoo.com

^۲ دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی a.layeghi@gmail.com

^۳ دانشکده مهندسی برق دانشگاه کاشان

چکیده - تشخیص صوتی تخلیه جزئی یکی از آزمایشهای استاندارد است که برای ارزیابی سلامت عایقی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش، جهت ذخیره‌سازی اطلاعات اندازه‌گیری شده، معمولاً از اسیلوسکوپ‌های دیجیتال استفاده می‌شود. شکل-موجهایی که توسط دستگاه‌های ثبت‌کننده دیجیتالی ذخیره می‌گردند، حامل نویز و نوسانات ناشی از گسسته‌سازی هستند. خطاهای جزئی نظیر تخلیه جزئی، در طول آزمایش ضربه، دارای ماهیتی نوسانی با میرایی زیاد و انرژی پایین هستند. بنابراین لازم است روشی که برای حذف نویز شکل‌موج‌های اندازه‌گیری شده به کار برده می‌شود، از یکسو نویزهای بیان شده را حذف نموده و از سوی دیگر مشخصات جزئی پدیده تخلیه الکتریکی را حفظ نماید. در این بخش روشی مبتنی بر تبدیل موجک مختلط دو درختی ارائه شده است که می‌تواند اهداف مذکور را برآورده نماید و معیارهای نویززدایی را بهبود بخشد.

کلید واژه- تخلیه الکتریکی، تبدیل موجک مختلط دو درختی، تابع آستانه، نویززدایی

میزان تخلیه جزئی پی‌برد. هر یک از روش‌های آشکارسازی عوامل ناشی از تخلیه جزئی مزایا و معایب خاص خود را دارند که باعث می‌گردد هر یک از این روش‌ها در تجهیزات مختلف ارجحیت یابند.

در این مقاله از روش صوتی برای دریافت سیگنال‌های تخلیه جزئی استفاده شده است. روش صوتی علاوه بر سرعت بالا دارای دقت قابل قبول و هزینه پایینی نیز است. از محدودیت‌های این روش می‌توان به ضعیف بودن سیگنال‌های صوتی تولیدی توسط تخلیه جزئی و ماهیت پیچیده صوت و انتشار آن اشاره کرد. علاوه بر این در محیط ترانسفورماتور نویزهای صوتی داخلی و خارجی نظیر نویز Barkhausen ناشی از هسته ترانسفورماتور و یا نویز ناشی از برخورد شن یا قطره‌های باران به بدنه تانک ترانسفورماتور وجود دارند. از اینرو نویززدایی از سیگنال‌های دریافتی از اهمیت بالایی برخوردار است [۳]. روش‌های مختلفی برای این منظور مانند متوسط‌گیری، فیلترهای FIR، تبدیل موجک استفاده می‌شود. در این مقاله از روش تبدیل موجک مختلط دو درختی استفاده شده است.

۱- مقدمه

همیشه نمی‌توان در ساخت قطعات عایقی مانع ایجاد ناهمگنی و ناخالصی در مواد عایقی شد. وقتی عایق مورد نظر بین الکترودها قرار پیر شدن ترانسفورماتورها، شبکه‌های برق را با ریسک بزرگی مواجه می‌کند، چون اثرات شکست ترانسفورماتور می‌تواند فاجعه بار باشد. نظارت بر عملکرد قسمت‌های مختلف تجهیزات و شرایط لحظه‌ای اجزا مختلف به منظور تشخیص به موقع عوامل موثر در ایجاد خطا و در نتیجه جلوگیری از به وجود آمدن عیب را پایش می‌گویند. در حال حاضر سیستم‌های پایش مختلف در ترانسفورماتورهای قدرت وجود دارند [۱].

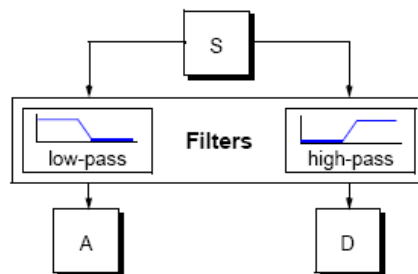
با آشکار شدن اثر مخرب پدیده تخلیه جزئی بر روی عایق‌ها کوشش‌های زیادی صرف تحقیقات در این زمینه گردید. عوارض ناشی از تخلیه جزئی عبارتند از: تشعشعات نوری، امواج صوتی، فرایند شیمیایی، افزایش ناگهانی $tg\delta$ و پالس‌های الکتریکی. با بررسی و اندازه‌گیری هر یک از عوارض مذکور می‌توان به شدت و

۲- تبدیل موجک به عنوان ابزار آشکارسازی

تحلیل موجک از تابع اولیه‌ای به نام موجک مادر استفاده می‌کند. این تابع دارای متوسط صفر بوده و سریعاً به صورت نوسانی میرا می‌شود. به شکل ریاضی، تبدیل موجک پیوسته (CWT) سیگنال $x(t)$ ، نسبت به موجک مادر $g(t)$ بصورت (۱) تعریف می‌شود [۴]:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

در رابطه فوق a ضریب انبساط یا ضریب مقیاس و b ضریب انتقال بوده و هر دو پیوسته می‌باشند. مشابه با نسبت بین تبدیل فوریه پیوسته و تبدیل فوریه گسسته، تبدیل موجک پیوسته، معادلی به نام تبدیل موجک گسسته دارد. در بسیاری از سیگنال‌ها، مولفه فرکانس پایین بخش مهمی از سیگنال بوده و هویت اصلی سیگنال را بیان می‌کند. در تبدیل موجک، تقریب‌ها مفسر مقیاس‌های بالا یا فرکانس‌های پایین بوده و جزءها بیان‌کننده مولفه‌های فرکانس بالا یا مقیاس پایین هستند. فرآیند فیلترینگ در اصلی‌ترین سطح خود به صورت شکل ۱ است.



شکل ۱: فیلترینگ سیگنال در اصلی‌ترین سطح

در این روش موجک مادر به عنوان فیلتر پایین گذر $l(n)$ بوده و دوگان آن به عنوان فیلتر بالاگذر $h(n)$ استفاده می‌شود و ارتباط آنها مانند (۲) است [۵].

$$h[L-1-n] = (-1)^n l(n) \quad (2)$$

در رابطه فوق L طول فیلتر است. فیلترهایی که شرایط فوق را برآورده می‌سازند در حوزه تحلیل سیگنال‌ها به نام فیلترهای ربع بازتابی نامیده می‌شوند.

۳- تبدیل موجک مختلط دو درختی

تبدیل موجک مختلط دو درختی ارتقا نسبتاً جدیدی نسبت به تبدیل موجک گسسته است. این تبدیل برای از بین بردن ۴

نقیصه موجود در تبدیل موجک گسسته ارایه شده است که در زیر به آن‌ها اشاره شده است [۶ و ۷].

(۱) نوسانات: از آنجایی که موجک‌ها توابع میان‌گذر هستند، ضرایب موجک در اطراف تغییرات ناگهانی سیگنال مانند لبه‌ها در تصویر دارای نوسانات مثبت و منفی هستند که این امر پردازش مبتنی بر موجک سیگنال را دشوار می‌سازد. (۲) متغیر نسبت به جابجایی: یک جابجایی کوچک سیگنال در اطراف تغییرات ناگهانی آن منجر به تغییر بسیار زیاد الگوی نوسان ضرایب تبدیل موجک می‌شود که این امر نیز منجر به پیچیده کردن پردازش‌های مبتنی بر تبدیل موجک می‌شود.

(۳) دندان‌دار شدن تصاویر: از آنجایی که ضرایب موجک توسط زیرنمونه برداری‌های متوالی و فیلتر شدن توسط فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر غیرارائه‌ال محاسبه می‌شوند، دندان‌دار شدن قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد.

(۴) جهت‌دار بودن ناکافی: کمبود انتخاب جهت‌دار در تبدیل موجک گسسته باعث پیچیده کردن پردازش ویژگی‌های تصویر مانند شیارها و لبه‌ها می‌شود.

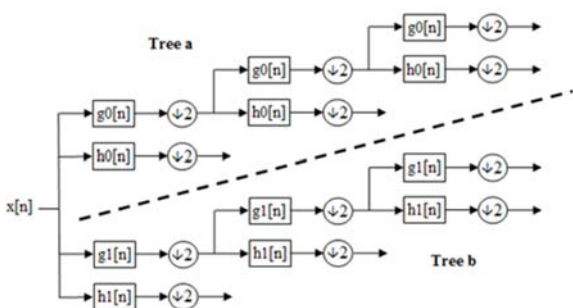
تبدیل موجک گسسته یک بعدی، سیگنال ورودی $x(t)$ را بر حسب توابع موجک ψ و مقیاس ϕ بنا بر (۳) نمایش می‌دهد.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(n) \phi(t-n) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(j, n) 2^{\frac{j}{2}} \psi\left(2^{\frac{j}{2}} t - n\right) \quad (3)$$

ضرایب مقیاس $c(n)$ و ضرایب موجک $d(j, n)$ بنا بر روابط مشخصی محاسبه می‌شوند. در تبدیل موجک مختلط تابع موجک و مقیاس به شکل مختلط در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} \psi_c(t) &= \psi_r(t) + j\psi_i(t) \\ \phi_c(t) &= \phi_r(t) + j\phi_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

تجزیه سیگنال تا سه سطح در قسمت حقیقی و موهومی در (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: تبدیل موجک مختلط

۴- حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک

در سیگنال‌های گسسته زمانی یک بعدی فرکانس‌های بالا بر روی جزء‌های سطوح اول تاثیر گذار و فرکانس‌های پایین در سطوح نهایی و نیز تقریب‌ها ظاهر می‌شوند.

۴-۱- مدل نویز در سیگنالهای یک بعدی

برای بیان مدل سیگنال نویزدار از (۵) استفاده می‌شود:

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n) \quad (5)$$

در ساده‌ترین مدل فرض می‌شود که، نویز سفید بوده و سطح نویز () برابر یک باشد. منظور از حذف نویز از سیگنال آلوده عبارت است از حذف بخش $e(n)$ از سیگنال و بازیابی سیگنال اصلی $f(n)$.

۴-۲- اصول حذف نویز

روند حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک شامل سه مرحله است [۸]:

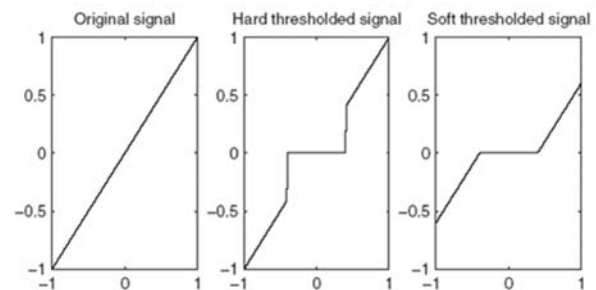
(۱) تجزیه: در این مرحله موجک مادر انتخاب شده و سطح N برای تجزیه سیگنال S مشخص می‌شود. سپس جزء‌ها و تقریب‌ها تا سطح N محاسبه می‌شود.

(۲) تعیین مقدار آستانه ضرایب جزء‌ها: در این مرحله برای هر کدام از سطوح ۱ تا N ، تابع آستانه‌ای سخت و یا تابع آستانه‌ای نرم تعیین شده، به ضرایب جزء اعمال می‌شود.

(۳) بازسازی: با استفاده از ضرایب تقریب اصلی حاصل شده در سطح N و ضرایب جزء اصلاح شده در سطوح ۱ تا N و اصول بازسازی سیگنال در تبدیل موجک، سیگنال اصلاح شده به دست می‌آید.

۴-۳- تابع آستانه‌ای نرم و سخت

شکل ۳ نشان‌دهنده سیگنال آستانه‌ای سخت و آستانه‌ای نرم در مقایسه با سیگنال اصلی بوده و توابع ریاضی متناظر با آنها در (۶) و (۷) به ترتیب بیان شده است [۹].



شکل ۳: تابع آستانه‌ای سخت و نرم سیگنال x

$$\text{Hard Thresholding Signal} = \begin{cases} x & |x| > thr \\ 0 & |x| \leq thr \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Soft Thresholding Signal} = \begin{cases} (x - thr) & |x| > thr \\ 0 & |x| \leq thr \end{cases} \quad (7)$$

۴-۴- روش‌های انتخاب مقدار آستانه

برای تعیین مقدار آستانه، چهار روش ذیل در [۲] پیشنهاد می‌شود.

- (۱) انتخاب مقدار آستانه براساس تخمین $SURE$: در این روش مقدار خطر برای مقادیر مختلف thr محاسبه و با مینیمم کردن مقدار مقدار خطا مقدار آن محاسبه می‌شود.
- (۲) استفاده از مقدار ثابت برای آستانه: این مقدار از (۸) به دست می‌آید:

$$thr = (2 \log(\text{length}(s))) \quad (8)$$

(۳) ترکیبی از روشهای اول و دوم: اگر مقدار سیگنال به نویز خیلی کوچک باشد، تخمین $SURE$ بسیار نویزی خواهد بود. اگر چنین حالتی تشخیص داده شود، روش دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(۴) استفاده از اصول مینیمم ماکزیمم‌ها: با توجه به این که حذف نویز سیگنال مشابه با تخمین‌گر تابع برگشتی نامعین است، لذا تخمین‌گر مینیمم ماکزیمم‌ها می‌تواند در این مورد به کار رود.

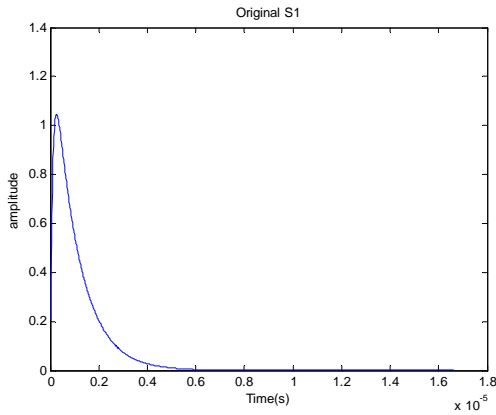
۴-۵- حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک

با توجه به مفهوم انرژی سیگنال و نویز، ضرایب موجک سیگنال و نویز در سطوح مختلف، می‌توانند شکل موج اصلی را توصیف نمایند. لذا با استفاده از یک مقدار آستانه از پیش انتخاب شده برای هر سطح، می‌شود اطلاعاتی را که در مقیاسهای مختلف از نویز ناشی می‌شوند، صفر نمود. هرچه ضرایب موجک نویز بزرگتر باشد، مقدار آستانه انتخابی بزرگتر بوده و انرژی بیشتری از سیگنال برداشته می‌شود. جهت حذف نویز، مراحل زیر بر روی سیگنال اندازه‌گیری شده اعمال می‌شود:

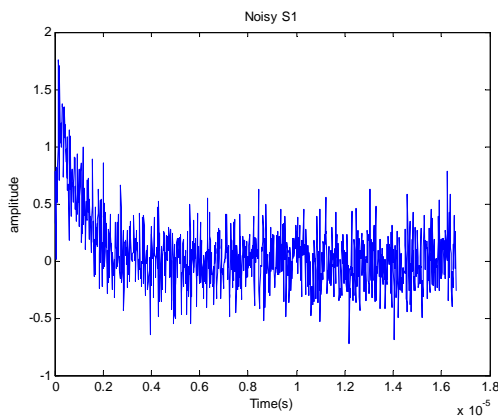
ابتدا سیگنال ورودی فیلتر شده و مجموعه ضرایب $\{w_{j+1,k}, w_{j+2,k}, \dots, w_{j+J,k}\}$ در هر سطح محاسبه می‌گردند. در شکل ۴ نحوه محاسبه مجموعه فوق به صورت تک درختی نمایش داده شده است.

S ₁	α ₁ =1e6	α ₁ =1e7	A=1.5	
S ₂	A=1	t ₀ =1us	τ=2us	f ₀ =250kHz

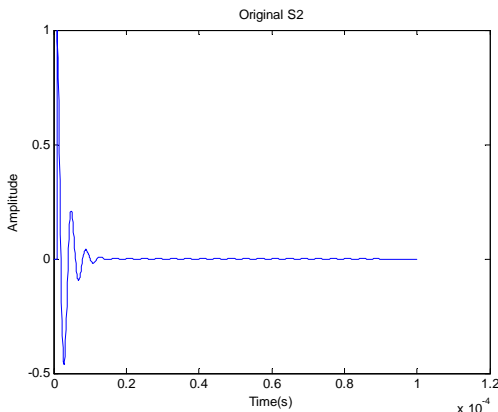
این دو سیگنال را با نویز سفید 0db ترکیب کرده و سپس با استفاده از تبدیل موجک نویززدایی می کنیم. موج اصلی و سیگنال نویزدار در شکل ۵ نشان داده است.



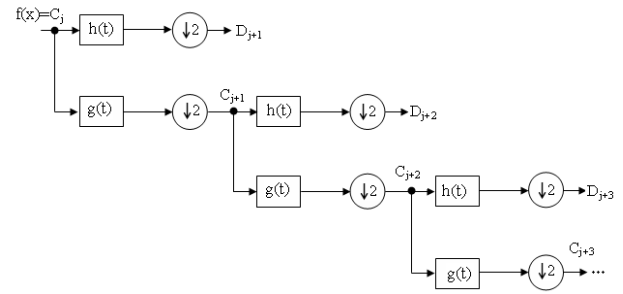
الف



ب



ج



شکل ۴: تعیین بردار ضرایب موجک $\{W_{j+m,k}\}$

اعمال آستانه به $W_{j+m,k}$ با استفاده از سطوحی که از قبل مشخص شده است. مقدار اولیه تابع آستانه‌ای نرم برابر $thr = \sigma \sqrt{2 \log n}$ تعریف می‌شود که در آن σ سطح نویز (و یا شدت نویز) است.

در انتها، تابع موجک معکوس بر روی ضرایب موجک و مقیاسها اعمال می‌گردد. مجموع تمام مولفه‌های جزءها و تقریب‌های تخمین زده شده، سیگنال بدون نویز را به دست می‌دهد.

۴-۶- اعمال روش حذف نویز بر روی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

با استفاده از سه معیار ذیل به بررسی و تفاوت خروجی تبدیل موجک گسسته با تبدیل موجک مختلط پرداخته شده است. از تابع همبستگی متقابل برای میزان جابجایی سیگنال استفاده شده است [۱۰].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_{original} - s_{denoised})^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (s_{original} - \bar{s})(s_{denoised} - \overline{s_{denoised}})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (s_{original} - \bar{s})^2 (s_{denoised} - \overline{s_{denoised}})^2}} \quad (10)$$

$$R_{s_1 s_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{original}(t) s_{denoised}(t - \tau) dt \quad (11)$$

سیگنال‌های $s_{original}$ و $s_{denoised}$ به ترتیب سیگنال اصلی و سیگنال نویززدایی شده است. \bar{s} نیز مقدار متوسط آنها می‌باشد. روابط سیگنال‌های تخلیه جزیی در (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

$$S_1 = A(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (12)$$

$$S_2 = \begin{cases} Ae^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \cos(2\pi * f_0 * (t - t_0)) & t_0 \leq t \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (13)$$

جدول ۱: پارامترهای سیگنال شبیه سازی شده

جدول ۲: مقایسه معیار عملکرد روش نویزدایی

		MSE	γ	τ
Complex wavelet	S1	0.0054	0.951	0
	S2	0.0013	0.9024	0
DWT	S1	0.046	0.728	0
	S2	0.0068	0.7235	10us

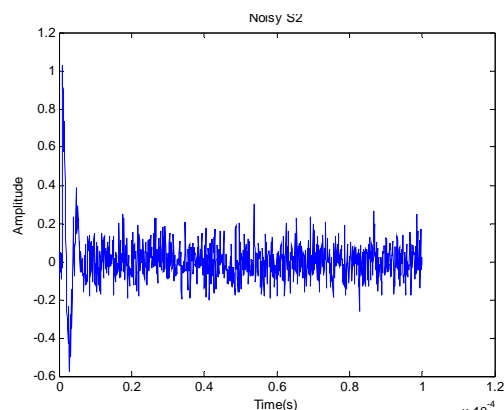
همانطور که در مقایسات نشان داده شده است این فیلتر نسبت به موجک گسسته بسیار بهتر عمل کرده است. البته لازم به ذکر است انواع مختلف تبدیل موجک مانند مولتی اسکیل، موجک بسته ای و ... برای نویزدایی استفاده شده و هر کدام نسبت به موجک گسسته برتری داشته است. آنچه در موجک مختلط نسبت به دیگر نویزدایی برتری دارد و از روی معیار همبستگی متقابل دیده می شود آن است که تاخیری در موج ایجاد نمی شود.

۵- آزمایش عملی

برای انجام آزمایش محیط ترانسفورماتور مانند شکل ۷ درست شده است. ارتفاع محفظه برابر ۱ متر و قطر آن ۸۰ سانتی متر می باشد. جنس بدنه از آلومینیوم می باشد. برای دریافت سیگنال آکوستیک از پیزوالکتریک 200LM450 استفاده شده است. منحنی عملکرد این پیزوالکتریک در [۱۱] وجود دارد. برای ایجاد تخلیه جزئی از یک ترانسفورماتور ۱۵ کیلوولت و از ترکیب سوزن- سوزن استفاده شده است.



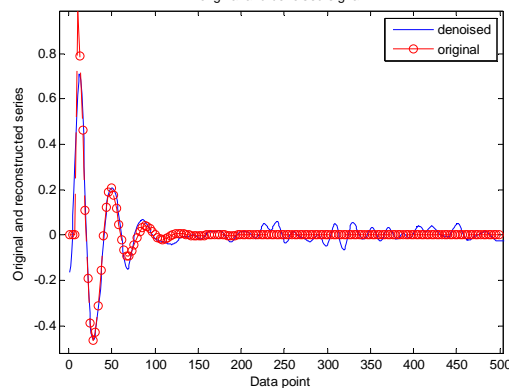
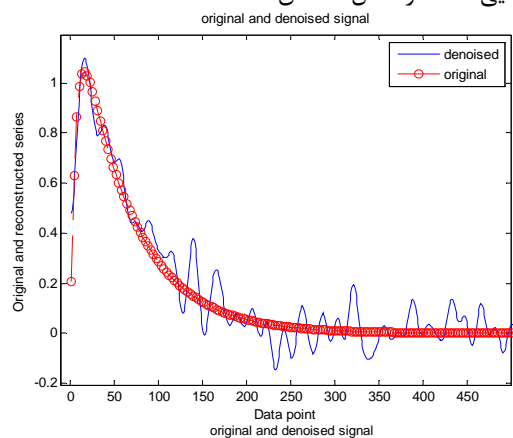
شکل ۷: چگونگی انجام آزمایش



د

شکل ۵: شکل موج های اصلی و همراه با نویز سیگنال s1 و s2

با استفاده از تبدیل موجک مختلط دو درختی سیگنال نویزدایی شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه سیگنال اصلی S1 و S2 و سیگنال نویزدایی شده

مقایسه نتایج با موجک گسسته بر اساس معیارهای بین شده در جدول ۲ خلاصه شده است.

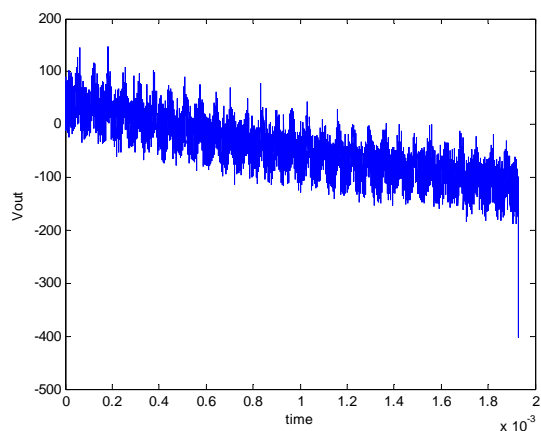
تا حدود ۱۰۰ کیلوهرتز در این شکل دیده می شود. این فرکانس ها برابر فرکانس صوتی تخلیه جزیبی می باشد.

۶- نتیجه گیری

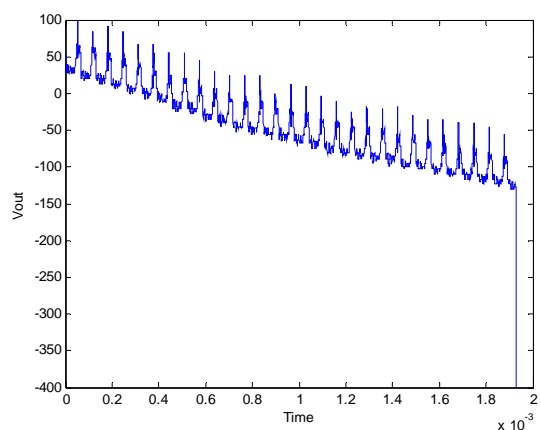
یکی از دلایل صدمه دیدگی ترانسفورماتورها تخلیه جزیبی می باشد از اینرو شناسایی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. از روش های مختلفی برای شناسایی آن استفاده می شود که در این مقاله از روش صوتی استفاده شده است. همواره اندازه گیری ها همراه نویز می باشد از اینرو نویززدایی یکی از مراحل مهم شناسایی تخلیه جزیبی می باشد. در این مقاله از تبدیل موجک مختلط دو درختی استفاده شده است. نتایج خروجی از مزیت بسیار بالای این روش نسبت به تبدیل موج گسسته نشان می دهد که از جمله آن عدم شیفت زمانی در آن می باشد.

منابع

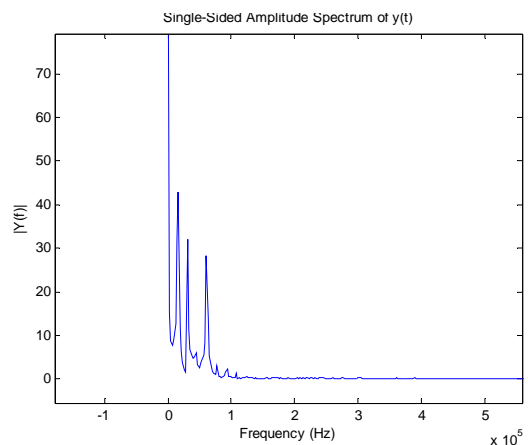
- [1] M. S. Naderi, G. B. Gharehpetian, M. Abedi, T. R. Blackburn, "Soft-Threshold Wavelet De-Noising Technique Application for a Single Arc Discharge Across a Static Gap", Proc. of 8th Int. Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials, Vol. 1, pp. 44-47, Bali, 2006
- [2] G. Strang, T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks", Wellesley-Cambridge Press, 1996
- [3] "Partial discharge - Part XIV: Acoustic partial discharge detection - Practical application," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 8, no. 1, pp. 34-43, Jan./Feb. 1992.
- [4] C. H. Kim and R. Aggarwal, "Wavelet Transforms in Power Systems, part I: General Introduction to the Wavelet Transforms", Inst. Elec. Eng. Power Eng. Journal, pp. 81-87, Apr. 2000.
- [5] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, MATLAB Help, Wavelet Toolbox, for use with MATLAB
- [6] Selesnick, I.W. ; Baraniuk, R.G. ; Kingsbury, N.C., "The dual-tree complex wavelet transform", Signal Processing Magazine, IEEE Volume:22 , Issue: 6
- [7] Nick Kingsbury, "Complex Wavelets for Shift Invariant Analysis and Filtering of Signals", Volume 10, Issue 3, May 2001, Pages 234-253
- [8] Donoho, D. L. (1995), "De-Noising by Soft-thresholding", IEEE Trans. on Inf. Theory, Vol. 41, No. 3, pp. 613-627, May 1995.
- [9] Luofeng, Wushunjun, Jiaolicheng and Zhanglinrang, "Implementation of De-Noise DWT Chip Based on Adaptive Soft-Threshold", Proceedings of ICSP2000, pp. 614-618, 2000
- [10] Cao F.F.C. Cunha, André T. Carvalho, Mariane R. Petraglia, Antonio C.S. Lima, "A new wavelet selection method for partial discharge denoising", Electric Power Systems Research 125 (2015) 184-195
- [11] <http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/uwtx/uwtxa.htm>



شکل ۸: سیگنال اندازه گیری شده توسط پیزوالکتریک



شکل ۹: سیگنال نویززدایی شده



شکل ۱۰: پاسخ فرکانسی سیگنال اندازه گیری شده

سیگنال های دریافتی در شکل ۸ و سیگنال نویززدایی شده در شکل ۹ و پاسخ فرکانسی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

سیگنال ها با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال ۲ MHz نمونه برداری شده است. همانطور که دیده می شود فرکانس های