

## روش تبدیل فوریه گسسته برای حذف مولفه DC میرا شونده در تخمین فازور

رضا محمدی چپنلو  
دانشکده برق دانشگاه امیرکبیر  
[reza.mohamadi@gmail.com](mailto:reza.mohamadi@gmail.com)

حامد خدادادی  
دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت  
[Khodadadi\\_hamed@yahoo.com](mailto:Khodadadi_hamed@yahoo.com)

علی مجذوب قدیری  
دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت  
[majzooob\\_ghadiri@yahoo.com](mailto:majzooob_ghadiri@yahoo.com)

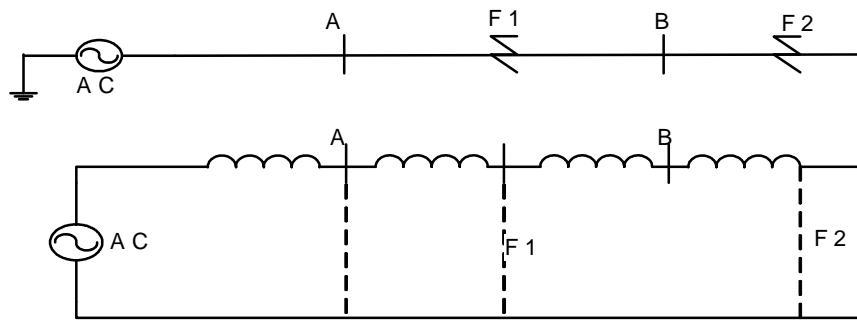
### چکیده :

در هنگام تغییرات ناگهانی در شبکه قدرت که بیشتر ناشی از وقوع خطا می باشد، یک موج dc میرا شونده در شکل موج جریان ایجاد می گردد که در محاسبه فازور مخصوصاً برای مقاصد حفاظتی ایجاد خطای محاسباتی می نماید. در این مقاله یک روش با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) برای حذف اثر مؤلفه DC میرا شونده می باشد، برای همه نوع سیستم های قدرت و تحت هر شرایط خطا مناسب است. کاربرد روش ارایه شده در طراحی رله دیستانس بررسی و عملکرد آن در مقایسه با روش های دیگر ارزیابی شده است. برای این منظور شبیه سازی یک خط نمونه با استفاده از نرم افزار تحلیل حالت گذرای الکترومغناطیسی (EMTP) انجام شده و نمونه های دریافت شده توسط نرم افزاری که بر اساس الگوریتم ارایه شده تهیه شده است، تحلیل و نتایج شبیه سازی ارایه شده است.

**کلمات کلیدی :** کنترل ، رله دیستانس ، فازور ، DFT ، EMTP

### مقدمه :

یکی از مهمترین عوامل توسعه اقتصادی - اجتماعی در هر کشوری کیفیت منابع تأمین برق آن کشور است. تقریباً ۹۰٪ تلفات زیان مصرف کنندگان ناشی از خطاهایی است که در شبکه های توزیع و انتقال رخ می دهد و مصرف کنندگان خواستار تأمین برق در سطح ایمنی بسیار بالا از ناحیه تولیدکنندگان می باشند. اگر چه رسیدن به این هدف با طراحی مناسب شبکه و بهره گیری از تجهیزات پیشرفته برق رسانی امکان پذیر است اما فراهم آوردن ساختار حفاظتی مناسب و تنظیم درست برای رله ها به منظور هر چه سریع تر جدا شدن قسمت های آسیب دیده نیز در این میان از نقش اساسی برخوردار است. حفاظت دیستانس شرایط لازم برای قابلیت اعتماد و سرعت لازم برای حفاظت از این مدارها فراهم می آورد و از همین رو در سیستم قدرت بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. برای سیستم شکل زیر رله ای که در نقطه A قرار دارد برای تعیین  $Z = V/I$  از جریان و ولتاژ خط استفاده می کند. مقدار امپدانس Z به هنگام رخداد خطا در  $F_1$  برابر  $Z_{AF1}$  و برای خطای  $F_2$  برابر  $(Z_{AB} + Z_{BF2})$  خواهد بود.



شکل ۱- محاسبه خطا در خط انتقال

امتیاز اصلی استفاده از رله دیستانس در آن است که ناحیه حفاظت آن به امپدانس خط حفاظت شده که به بزرگی ولتاژ و جریان آن وابسته نیست بستگی دارد.

یکی از اصلی ترین عواملی که باعث بروز خطا در محاسبه امپدانس توسط رله می شود، وجود مؤلفه DC عامل نمایی است که در تحلیل حالت گذرای یک خط به هنگام خطا به وجود می آید. روش های مختلفی برای حذف این مؤلفه وجود دارد اغلب این روش ها از الگوریتمی برای فیلتر کردن شکل موج اتصال کوتاه و یافتن مؤلفه هارمونیک اصلی سیستم استفاده می کنند. روش میمیک فیلتر، روش کمترین مربعات (LSF)<sup>۱</sup> و روش تبدیل فوریه گسسته از روش های ارائه شده هستند. اما اغلب این روش ها یا از سرعت مناسبی برای یافتن پاسخ نهایی برخوردار نمی باشند و یا برای یافتن پاسخ سریع احتیاج دارند که ثابت زمانی خطی که در آن خطا اتفاق افتاده است به ثابت زمانی پیش فرض که قبلاً در الگوریتم این روش ها در نظر گرفته شده نزدیک باشد و چون ثابت زمانی خط به دلیل امکان وقوع خط در نقاط مختلف خط عددی ثابت نمی باشد و تقریباً ناشناخته است، نمی توان از این روش ها به عنوان روشی سریع با قابلیت اطمینان بالا استفاده نمود. به همین دلیل هدف اصلی این مقاله بررسی و پیشنهاد یک روش سریع و مطمئن برای حذف مؤلفه DC و تشخیص سریع دامنه و زاویه فازور مؤلفه فرکانس اصلی سیگنال های ولتاژ و جریان بعد از وقوع خطا در سیستم می باشد. پایه اصلی الگوریتم این روش بر اساس متد تبدیل فوریه گسسته می باشد.

برای شبیه سازی سیگنال های ولتاژ و جریان اتصال کوتاه از نرم افزار تحلیل حالت گذرای الکترومغناطیسی استفاده شده است و سپس به کمک نرم افزاری که به منظور شبیه سازی حذف مؤلفه DC طراحی گشته نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در فصول آینده تک تک این مراحل به طور کامل توضیح داده خواهند شد.

### ۱- روش حذف مؤلفه DC میراشونده

در این بخش اساس ریاضی روش پیشنهادی را برای حذف اثرات منفی مؤلفه DC میراشونده در الگوریتم DFT بیان شده است. ابتدا اثر مؤلفه DC روی تبدیل فوریه گسسته DFT بیان شده است. سپس یک روش برای حذف این اثرات پیشنهاد شده است.

فرض کنید سیگنال جریان ورودی به یک وسیله حفاظتی در زمان وقوع خطا شامل مؤلفه فرکانس اصلی هارمونیک ها (تا هارمونی p ام) و همچنین مؤلفه DC نمایی میراشونده می باشد که به صورت رابطه زیر نشان داده می شود:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} + \sum_{k=1}^p I_k \cdot \sin(k \cdot \omega_1 \cdot t + q_k)$$

1-least square fit

(۱-۱)

به طوری که  $T$  فاصله زمانی نمونه برداری و  $n$  در حقیقت  $n$  امین نمونه می باشد. خروجی مؤلفه فرکانس اصلی الگوریتم FCDFT به صورت زیر می باشد:

$$dft_1^t = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot (\sin(w_1 \cdot n \cdot t) + j \cdot \cos(w_1 \cdot n \cdot t)) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot j \cdot e^{-w_1 \cdot n \cdot t} \quad (2-1)$$

که در آن  $dft_1^t$  خروجی فیلتر تبدیل فوریه گسسته برای مؤلفه اصلی مربوط به تمام ورودی های  $N$  تعداد نمونه ها در هر سیکل می باشد. دیده می شود که هارمونی ها با استفاده از فیلتر FCDFT اصلی حذف می شوند و فقط مؤلفه فرکانس اصلی و مؤلفه DC میرا شونده در خروجی فیلتر FCDFT مشاهده می شوند از آنجایی که فازور دقیق مؤلفه اصلی را لازم داریم باید مؤلفه DC نمایی را از خروجی فیلتر FCDFT اصلی حذف نماییم اولین مرحله برای رسیدن به این هدف پیدا کردن پاسخ تبدیل فوریه گسسته FCDFT مؤلفه فرکانس اصلی فقط به مؤلفه DC میرا شونده می باشد این پاسخ به صورت زیر می باشد.

$$dft_1^{dc} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_0 \cdot e^{\frac{-n \cdot T}{t}} \times j \cdot e^{-w_1 \cdot n \cdot T} = \frac{2}{N} \cdot j I_0 \cdot \frac{1 - e^{\frac{-n \cdot T}{t}}}{1 - e^{\frac{-T}{t}} \times e^{-j \cdot w_1 \cdot T}} \quad (3-1)$$

به طوری که  $dft_1^{dc}$  خروجی تبدیل فوریه گسسته فرکانس اصلی فقط مربوط مؤلفه DC میرا شونده می باشد. حال خروجی تبدیل فوریه گسسته فرکانس اصلی مربوط به مؤلفه فرکانس اصلی به صورت زیر به دست می آید:

$$dft_1^{1f} = dft_1^t - dft_1^{dc} \quad (4-1)$$

به طوری که  $dft_1^{1f}$  خروجی فرکانس اصلی، مربوط به فرکانس اصلی سیگنال می باشد. با استفاده از رابطه با فازور مؤلفه اصلی می تواند تخمین زده شود، به شرط این که پاسخ فرکانسی اصلی تبدیل فوریه گسسته (FCDFT) به مؤلفه DC نمایی تعیین می شود که این مؤلفه با به دست آوردن پارامترهای آن به دست می آید.

## ۲- تعیین پارامترهای مؤلفه DC نمایی

از قسمت قبل می دانیم که به منظور تعیین فازور مؤلفه اصلی فرکانس نیاز داریم که پاسخ فرکانس اصلی تبدیل فوریه گسسته را به مؤلفه DC میرا شونده تعیین کنیم. از رابطه مربوط به  $dft_1^{dc}$  معلوم می شود که تابعی از دامنه  $I_0$  و ثابت زمانی  $\tau$  مؤلفه DC می باشد. بنابراین روشی باید برای تعیین دامنه و ثابت زمانی مؤلفه DC تعیین کرد. جریان خطا و ولتاژ ممکن است از مؤلفه فرکانس اصلی، مؤلفه DC میرا شونده، هارمونیک های فرکانس بالا و نویزها تشکیل شده باشد. یک فیلتر فرکانس پایین برای هر کانال ورودی آنالوگ برای حذف هارمونیک های فرکانس بالا به کار می رود. مؤلفه های با فرکانس خیلی بالا در خروجی فیلتر پایین گذر دیده نمی شوند. بر اساس همین حقیقت فیلتر FCDFT که مؤلفه های فرکانسی خیلی بالا را از خود عبور می دهد می تواند طراحی شود. در فرکانس های خیلی بالا مؤلفه فرکانس اصلی و مؤلفه های هارمونیک دیگر در خروجی دیده نمی شود. فقط مؤلفه DC میرا شونده می تواند در خروجی تأثیر بگذارد. از روی همین خروجی فیلتر دامنه و ثابت زمانی می تواند تخمین زده شود. فیلتر به کار رفته باید هارمونیک  $m$  ام را از خود عبور دهد که فرکانس  $m$  ام باید خیلی بزرگتر از فرکانس قطع فیلتر پایین گذر بوده و پایین تر از نصف فرکانس نمونه برداری باشد. خروجی فیلتر FCDFT هارمونیک  $m$  ام فقط شامل مؤلفه DC نمایی می باشد که به صورت زیر می باشد:

$$dft_m^{dc} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_0 \cdot e^{\frac{-n \cdot T}{t}} \times j \cdot e^{-w_1 \cdot m \cdot T} = \frac{2}{N} \cdot j I_0 \cdot \frac{1 - e^{\frac{-n \cdot T}{t}}}{1 - e^{\frac{-T}{t}} \times e^{-j \cdot w_1 \cdot m \cdot T}}$$

(۱-۲)

به طوری که  $dft_m^{dc}$  خروجی فیلتر هارمونیک  $m$  ام می باشد. همانطور که دیده می شود مجموع بالا یک مجموع یک تصاعد هندسی می باشد که مجموع آن بدست آمده است. اگر رابطه را به صورت موهومی و حقیقی بنویسیم داریم: قسمت حقیقی برابر است با:

$$R = \frac{2}{N} \cdot \frac{I_0(1-E^N).E.\sin(w_1.m.T)}{1+E^2-2E.\cos(w_1.m.T)} \quad (۲-۲)$$

قسمت موهومی برابر است با:

$$I = \frac{2}{N} \cdot \frac{1+E^2-2E.\cos(w_1.m.T)}{I_0(1-E^N).E.(1-\cos(w_1.m.T))} \quad (۳-۲)$$

که در آن  $E = e^{\frac{-T}{\tau}}$  فرض شده است. اگر بخواهیم  $I_0$  و  $\tau$  را به دست آوریم، روابط را به صورت زیر می نویسیم:

$$E = \frac{R}{R.\cos(w_1.m.T) + I.\sin(w_1.m.T)} \quad (۴-۲)$$

(۵-۲)

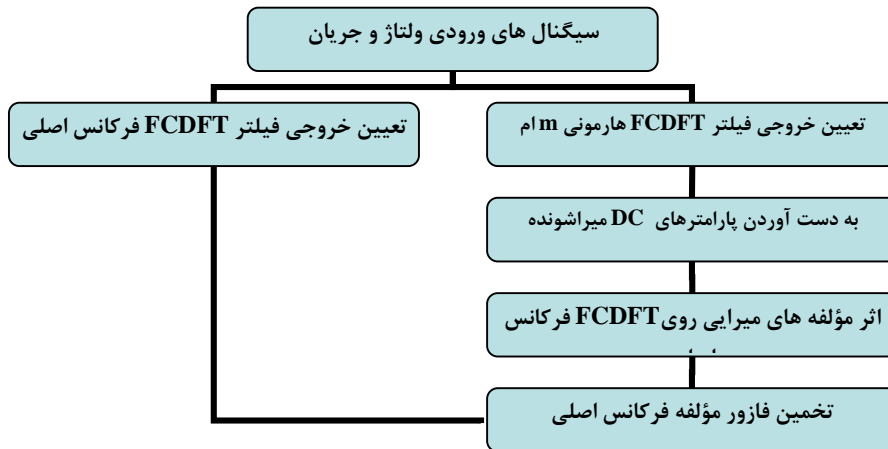
$$\frac{2}{N} \cdot I_0.(1-E^N) = \frac{R.(1+E^2-2.E.\cos(w_1.m.T))}{E.\sin(w_1.m.T)}$$

مقدارهای  $E$  و  $\frac{2}{N}I_0(1-E^N)$  به دست می آیند و سپس  $I_0$  و  $\tau$  به دست می آیند.

با استفاده از این مقادیر طبق رابطه بالا مؤلفه فرکانس اصلی FCDFT که مربوط به مؤلفه DC میراشونده می شود به دست می آید و سپس از رابطه بالا می توانیم استفاده کرده و  $dft_1^{1f}$  یعنی مؤلفه فرکانس اصلی FCDFT مربوط به هارمونی اول را به دست آوریم.

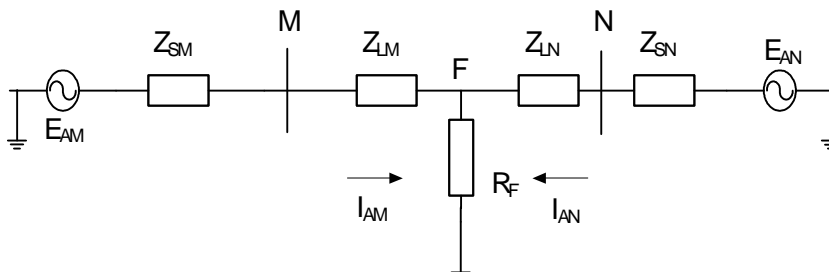
از آنچه توضیح داده شد می توان فهمید که این روش نیاز به دو فیلتر FCDFT دارد که یکی در فرکانس اصلی و دیگری در فرکانس مربوط به هارمونی  $m$  ام می باشد. فیلتر FCDFT هارمونیک  $m$  ام برای تعیین پارامترهای DC میراشونده می باشد.

الگوریتم این روش به صورت زیر خلاصه شده است:



۳- نتایج شبیه سازی برای خط انتقال نمونه

۳-۱- مشخصات الکتریکی خط لار به جهرم



شکل ۳-۱-۱: دیاگرام تک خطی خط انتقال  $230\text{ KV}$  لار به جهرم

دیاگرام بالا نقشه تک خطی خط انتقال مورد مطالعه را نشان میدهد. مطابق این دیاگرام فرض می شود که رله دیستانس مورد نظر در پست جهرم نصب شده است. شین های جهرم و لار توسط ترانسفورماتورهای  $400/230\text{ KV}$  تغذیه می شوند.

بر اساس اطلاعات گرفته شده از برق منطقه ای فارس قدرت اتصال کوتاه شینها بصورت زیر است:

**شین جهرم:**

$$I_{SC3ph} = 2575\text{ A}$$

$$I_{SC1ph} = 3226\text{ A}$$

$$S_{SC3ph} = 1026\text{ MVA}$$

$$S_{SC1ph} = 1285\text{ MVA}$$

$$\Rightarrow Z_{SCjhr} = \frac{V^2}{S_{SC}} = \frac{(230 \times 10^3)^2}{1026 \times 10^6} = 51.5594$$

$$I_{SC3ph} = 1855 \text{ A}$$

$$I_{SC1ph} = 2407 \text{ A}$$

$$S_{SC3ph} = 739 \text{ MVA}$$

$$S_{SC1ph} = 959 \text{ MVA}$$

$$\Rightarrow Z_{Sc\text{lar}} = \frac{V^2}{S_{SC}} = \frac{(230 \times 10^3)^2}{739 \times 10^6} = 51.5594$$

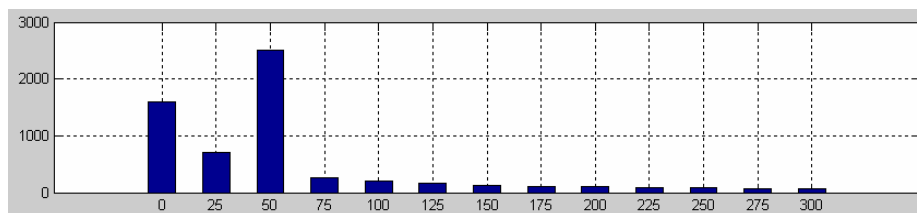
شین لار :

در جدول زیر مشخصات الکتریکی خط انتقال آورده شده است :

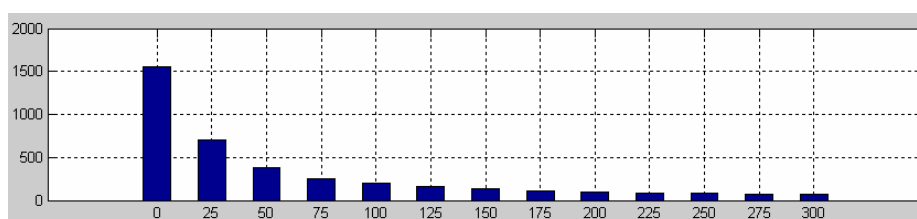
توالي	مقاومت (ohm / km)	راکتانس (ohm / km)
صفر	0.1064	0.8670
مثبت	0.0201	0.2868

جدول ۱-۱-۳: جدول مشخصات خط

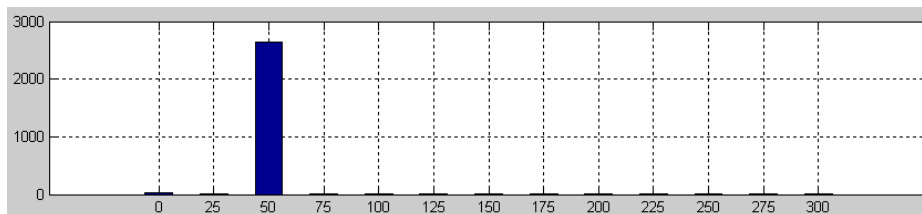
شکل ۱-۳-۲: خطاي تک فاز به زمین در فاز b در فاصله ۱۰۰ کیلومتری با مقاومت ۱۰ اهم اتصال کوتاه در زمان ۳۰ میلی ثانیه نشان می دهد.



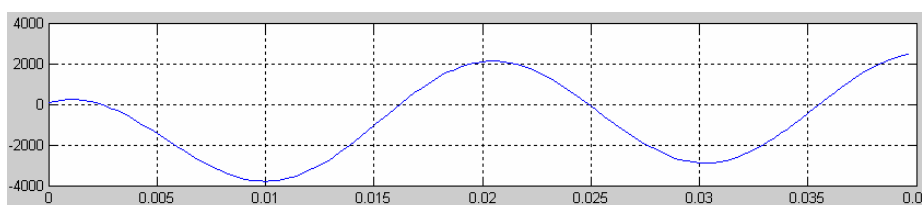
الف) نمودار تبدیل فوریه گسسته سیگنال جریان نمونه برداری شده



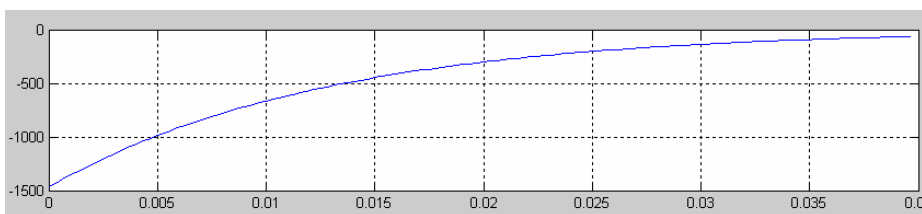
ب) نمودار تبدیل فوریه گسسته مولفه DC میرا شونده (حاصل از پارامترهای محاسبه شده)



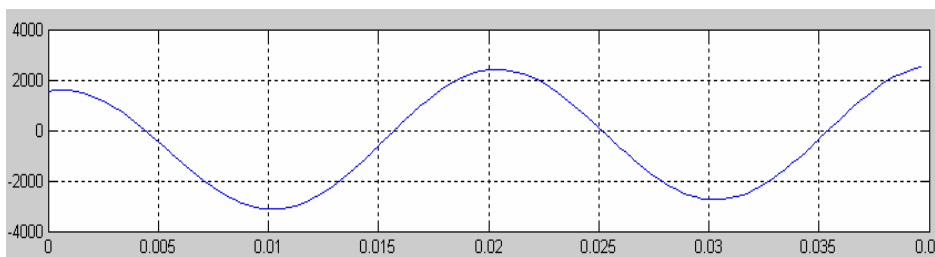
ج) نمودار تبدیل فوریه گسسته سیگنال پس از حذف DC میرا شونده



د) نمودار سیگنال جریان نمونه برداری شده \_ جریان (آمپر) بر حسب زمان (ثانیه)



ه) نمودار مولفه DC میرا شونده ( برگشت داده شده به حوزه زمان ) \_ جریان (آمپر) بر حسب زمان (ثانیه)



و) نمودار سیگنال پس از حذف DC میرا شونده ( برگشت داده شده به حوزه زمان ) \_ جریان بر حسب زمان

جدول ۳-۱-۲- خلاصه نتایج برای خطای شکل ۳-۱-۲

نتایج	زاویه فاز (درجه)	دامنه
خروجی فیلتر فرکانس اصلی	92.03	1458.47
خروجی فیلتر هارمونی m ام	-145.19	20.01
ثابت زمانی		0.012
دامنه نمایی		-1468.19
اثر مولفه نمایی روی فرکانس اصلی	-163.06	219.81
تخمین فازور مولفه فرکانس اصلی جریان	84.05	1529.83

### نتیجه گیری و پیشنهادها

در این مقاله روشی برای حذف اثر مؤلفه DC روی الگوریتم DFT ارائه شده است که وقتی با روش های پیشنهادی قبلی مقایسه می شود، الگوریتم پیشنهادی مزیت های مختلفی دارد. بر خلاف روش های دیگر روش پیشنهادی با تعیین پارامترها و ساده سازی برای سیستم ها و شرایط خطاهای مختلف قابل تنظیم است. این روش خروجی صحیح را بلافاصله بعد از این که پنجره اطلاعات از نمونه های خطا پر شد می دهد. روش ارائه شده از دو فیلتر که در فرکانس های مختلف به صورت موازی تنظیم شده استفاده می کند. این روش هیچ تأخیر اضافه ای را ایجاد نمی کند، اصول ساده ای دارد و می تواند در رله های میکروپروسسوری مورد استفاده قرار گیرد. رله دیستانس طراحی شده با روش پیشنهادی، تقریباً هیچ ناحیه نامطمئن گذرای ندارد. روش ارائه شده می تواند به الگوریتم نصف سیکل DFT نیز گسترش داده شود.

### منابع و مراجع:

[۱]. T. S. Sidhu, X. Zhang, F. Albasri and M. S. Sachdev, "Discrete-fourier-transform-based technique for removal of decaying DC offset from phasor estimates", IEE Proc-Gener. Transm., vol. 150, No. 6, November 2003.

[2]. A. T. Johns, S. K. Salman, "Digital protection for power Systems" , IEE Power Series 15, 1995.

[3]. Benmouyal. G, "removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering", IEEE Trans. Power Deliv., 1995, 10, pp. 621-630.

[4]. Sachdev. M.S., and Baribeau. M.A, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays ", IEEE Trans. Power Appar. Syst, 1979, 98, pp. 2232-2240.

[۳]. دکتر صادق جمالی، "حفاظت سیستمهای قدرت : حفاظت وسیگنال دهی دیجیتال"،

انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، سال ۱۳۸۰

[۴]. پایان نامه کارشناسی، "بررسی دوالگوریتم حفاظت دیجیتال"، استاد راهنما: دکتر جمالی

دانشجو : سهراب جیلای