

## روشی نوین با استفاده از درونیابی درجه ۳ برای محاسبه امپدانس دقیق در رله دیستانس

حسین عسکریان ایبانه<sup>\*\*</sup>، رضا محمدی<sup>\*</sup>، حسین ترکمن<sup>\*</sup>، فرزاد رضوی<sup>\*\*</sup> و سیدابراهیم افجهای<sup>\*\*</sup>

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت مقاله: ۸۶/۱/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۴/۴)

**چکیده** - در تمام روشهای محاسبه امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس از مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده می شود. دقت بالای امپدانس اندازه گیری توسط رله دیستانس نقش مهمی در قطع صحیح و به موقع قسمت خطا شده سیستم قدرت دارد. در این مقاله نشان داده می شود که چگونه خطای بسیار کم در محاسبه دامنه در لحظه مورد نظر در فرایند نمونه برداری باعث به وجود آمدن خطاهای بزرگ در محاسبات امپدانس خواهد شد، به منظور حل این مسئله یعنی کم کردن خطاهای به وجود آمده روش جدیدی بر اساس درونیابی درجه ۳ برای نمونه برداری بهینه معرفی می شود. به عبارت دیگر در این روش زمان و مقدار نمونه های به دست آمده اولیه توسط تکنیک درونیابی به نمونه هایی در زمانهای واقعی و به مقدار دامنه واقعی تبدیل می شوند. با استفاده از این تکنیک می توان دقت بسیار زیادی در محاسبات به دست آورد. در این راستا الگوریتمهای مهمی همچون تبدیل فوریه گسسته، تبدیل فوریه گسسته نیم سیکل، مان موریسون، حداقل مربعات، حداقل مربعات با حذف مقدار DC و پرودار ۷۰ برای محاسبه امپدانس در نرم افزار PSCAD طراحی و پیاده سازی شده اند و تاثیر تکنیک جدید در هر یک از این روشها مورد بررسی قرار گرفته اند و مقدار کاهش خطا با به کارگیری روش جدید نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: حفاظت شبکه های قدرت، محاسبه امپدانس، رله دیستانس، نمونه برداری، روشهای درونیابی

## A Novel Method for Impedance Calculation of Distance Relays Using Third Order Interpolation

H.A. Abyaneh, R. Mohammadi, H. Torkaman, F. Razavi, and E. Afjei

Department of Electrical Engineering, Amir Kabir University  
Department of Electrical & Computer Engineering, Shahid Beheshti University

**Abstract:** All algorithms for impedance calculation use an analog-to-digital converter. The high accuracy of the impedance seen by a distance relay is an important factor in the correct isolation of the faulty part of power systems. To achieve this, a novel

\*\* - استاد

\* - دانشجوی دکتری

*technique based on third order interpolation is used in this paper. According to this technique, the times and the values of the obtained samples are changed to real ones. To evaluate the new technique, it is applied to six digital distance algorithms, namely, Discrete Fourier Transform (DFT), Half-cycle Discrete Fourier Transform, Least Square, Mann-Morrison, Least Square with Delete Dc, and Prodar70. The technique is found to be capable of accurately computing the impedance in the algorithms mentioned. Comparisons are made among the results to show the efficiency of the new technique for decreasing errors in all algorithms.*

**Keywords:** Distance protection, Impedance calculation, Distance relay, Sampling, Interpolation technique.

## ۱- مقدمه

نظر آید که این خطاها قابل صرف نظر کردن هستند. ولی در این مقاله نشان داده می شود که این خطاهای بسیار کوچک می تواند خطاهای بزرگی را در امپدانس محاسبه شده ایجاد کند.

در تمامی روشهای محاسبه امپدانس بیان شده در مقالات فوق الذکر، فرض بر این است که یک شکل موج نمونه برداری شده، در فواصل مساوی زمانی در دسترس است. در صورتی که خطای نمونه برداری که به خاطر خطای دیجیتالی کردن ایجاد می شود، می تواند سبب شود که مقادیر اخذ شده برای محاسبه امپدانس با مقادیر واقعی تطابق نداشته و سبب ایجاد خطا در محاسبه امپدانس اندازه گیری شود.

در این مقاله تکنیکی برای بالا بردن دقت در محاسبات امپدانس محاسبه شده از دید رله دیستانس معرفی می شود این روش بر مبنای حذف خطای دیجیتالی کردن ADC ها قرار دارد. برای این کار از درونیابی درجه سه استفاده شده است. این تکنیک می تواند به کلیه روشهای موجود برای بالا بردن دقت اضافه شده و روشهای موجود را تکمیل کند. تکنیک یاد شده برای ۶ الگوریتم مهم محاسبه امپدانس اعمال شده و قدرت این تکنیک در بالا بردن دقت محاسبه امپدانس در این مقاله نشان داده می شود.

## ۲- شرح مسئله

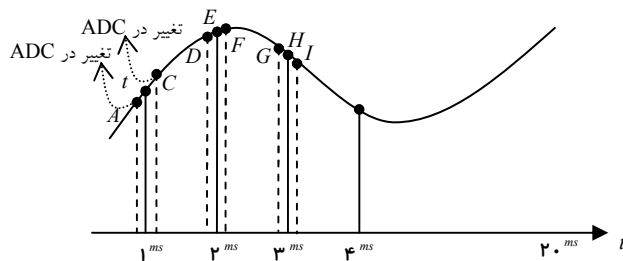
به واسطه تعداد بیت محدود ADC هایی که به طور معمول در رله های دیجیتال به کار می روند، خطاهایی در تبدیل سیگنالهای آنالوگ گسسته به مقادیر دیجیتال تولید می شود. مثال زیر نشان می دهد که خطای نمونه برداری چگونه می تواند باعث به وجود آمدن خطای محاسباتی شود.

برای حفاظت خطوط انتقال که یکی از مهمترین بخشهای سیستم قدرت است، از حفاظت دیستانس به عنوان حفاظت اصلی استفاده می شود. در محاسبات امپدانس در رله دیستانس روشهای مختلفی تا کنون بررسی و معرفی شده است که روشهای معمول به صورت تبدیل فوریه، حداقل مربعات، مان موریسون و ... هستند.

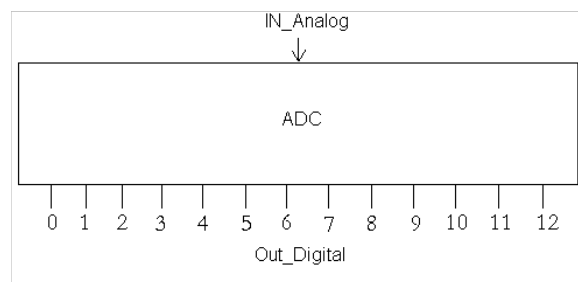
تعدادی از مقالات [۱ - ۳] از روشهایی مبتنی بر معادلات دیفرانسیل برای محاسبه امپدانس استفاده کرده اند. در مقالات [۴ و ۵] به بررسی روشهای محاسبه امپدانس از نظر پاسخ فرکانسی پرداخته شده است. پارامترهای مختلفی در رله دیستانس وجود دارد که یکی از مهمترین پارامترها، دقت در محاسبه امپدانس خط است [۶].

در محاسبه دقت امپدانس میزان دقت پارامترهای اندازه گیری شده یعنی نمونه های استخراج شده ولتاژ و جریانها نقش اساسی دارند [۶]. به عبارت دیگر هرچه مقدار نمونه های اخذ شده با میزان واقعی آنها در زمانهای مختلف نزدیکتر باشد دقت امپدانسهای محاسبه شده بالاتر است.

مقدار نمونه ها در زمانهای مربوطه باید مطابقت با مقدار واقعی آنها داشته باشد. ولی به خاطر دقت محدود ADC ها<sup>۱</sup> این مهم به طور کامل انجام نمی گیرد. در واقع به خاطر خطای دیجیتالی کردن<sup>۲</sup>، خطای کمی در دامنه نمونه ها ایجاد خواهد شد [۷ و ۸]. از آنجایی که مقادیر دامنه های نمونه ها نسبت به مقدار واقعی تفاوت کمی دارند یا به عبارت دیگر دارای خطاهای کوچکی هستند، بدون مقایسه امپدانسهای محاسبه شده توسط رله دیستانس و مقایسه آن با مقادیر واقعی امپدانسها، ممکن است به



شکل ۲- خروجی یک بلوک ADC



شکل ۱- بلوک یک ADC ۱۲ بیتی

این خطا در دیدگاه اول ممکن است بسیار کوچک باشد. ولی با شبیه‌سازی نرم‌افزاری، نشان داده خواهد شد که همین خطاهای کوچک، در الگوریتمهای پنجره متغییر، باعث ایجاد خطای زیادی می‌شوند. لذا لازم است روشی معرفی شود که اثر این خطا در محاسبه امپدانس باعث کاهش دقت نشود. این روش بر اساس درونیابی درجه سه بین دو نقطه قبل و بعد از نمونه‌برداری است که کم‌ارزش‌ترین بیت ADC در این زمان تغییر کرده است.

### ۳- مروری بر الگوریتمهای عددی موجود در حفاظت دیستانس دیجیتال

#### ۳-۱- چگونگی محاسبه امپدانس در رله دیستانس

برای محاسبه امپدانس در الگوریتمهای رله‌های دیستانس دیجیتال گامهای پایه‌ای تشخیص نوع و زمان اتصال کوتاه، نمونه‌برداری از موج ورودی و به‌دست آوردن دامنه و فاز هارمونیک اصلی انجام شود.

سپس به کمک روابط مربوطه امپدانس خطای زمین و فاز که نمونه آن در معادله (۱) آورده شده محاسبه امپدانس صورت می‌گیرد:

$$Z_A = \frac{V_{AN}}{I_A + kI_0}, Z_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \quad (1)$$

که در این معادله،  $V_{AN}$  مقدار ولتاژ فاز A نسبت به زمین،  $k$  ضریب جبران‌ساز رله و  $I_0$  جریان توالی صفر و همچنین  $V_B, V_A, I_B, I_A$  جریانها و ولتاژهای فازهای A و B هستند.

در مرحله دوم که نمونه‌برداری از موج انجام می‌گیرد، روش پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند مقادیر نمونه‌برداری را تا حد

فرض کنید در یک ADC ۱۲ بیتی که ورودی ولتاژ آن در یک شبکه قدرت تقریباً ۲۰۰۰۰ ولت باشد شکل، برای تبدیل سیگنال آنالوگ ورودی به بیت‌های دیجیتال برای محاسبه، هر یک از بیتها در حدود ۷۸ ولت است. این بدان معنی است که تا وقتی مقدار موج ورودی ۷۸ ولت تغییر نکند، خروجی ADC تغییر نمی‌کند.

نمونه‌برداری در ADC ۱۲ بیتی با سرعت بالا تقریباً به صورت پیوسته دیجیتال شده و موج ورودی را در اختیار می‌دهد. از آنجا که محاسبات مربوط به امپدانس زیاد است نمی‌توان به‌صورت پیوسته با این داده‌ها کارکرد. بدین منظور معمولاً تعداد نمونه ۳۲ و ۶۴ نمونه در یک سیکل را مورد بررسی قرار می‌دهند. در صورتی که ADC به مقدار  $4 \times 2^{12}$  بار تغییر وضعیت می‌دهد، ولی با ۳۲ یا ۶۴ نمونه در سیکل نمونه‌برداری صورت می‌گیرد. بنابراین با نرخ نمونه‌برداری ۶۴ نمونه در یک سیکل، در شکل (۲) فاصله بین B و E برابر  $\frac{20}{64}$  ms می‌شود.

فرض می‌شود اولین نمونه‌ای که باعث تغییر ADC قبل از نقطه B است، نقطه A باشد و اولین زمان بعد از B، که خروجی ADC عوض می‌شود، نقطه C باشد.

اگر نمونه‌برداری دقیقاً در زمان B رخ دهد، در واقع اندازه موج در زمان A گرفته شده است. چون از زمان A تا C، ADC هیچگونه تغییری نکرده است. ولی در واقع نمونه در نقطه B مورد نظر است که ADC قادر به دادن این نقطه نیست. چون بین دو مقداری است که کم‌ارزشترین بیت ADC نیز نمی‌تواند آنرا نمایش دهد.

بسیار زیادی دقیق کند. برای نشان دادن این موضوع، شش الگوریتم محاسبه امیدانس روش فوریه گسسته تمام سیکل [۷]، فوریه گسسته نیم سیکل [۷]، حداقل مربعات [۴]، حداقل مربعات با حذف مقدار DC [۵ و ۶]، مان موریسون و پرودار [۱] که در مراجع یاد شده به تفصیل آورده شده است، مورد بحث قرار می‌گیرد. در این روشها پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

$N$ : تعداد نمونه‌ها در یک سیکل

$M$ : تعداد نمونه‌ها بعد از رخداد خطا

$V_k$ : دامنه موج عنصر نمونه‌برداری شده  $k$ ام

$V_{real}$ : مقدار حقیقی هارمونیک اصلی موج

$V_{imag}$ : مقدار موهومی هارمونیک اصلی موج

$\theta$ : زاویه هارمونیک اصلی موج

$f$ : فرکانس موج

با توجه به تشریح کامل این روشها در مراجع یاد شده، فقط دو نمونه از این روشها یعنی فوریه گسسته تمام سیکل و حداقل مربعات به‌طور خلاصه آورده می‌شود:

### ۳-۲- روش فوریه تمام سیکل [۷]

در روش فوریه تمام سیکل با توجه به نمونه‌برداری  $N$  نمونه در یک سیکل کامل و براساس معادله زیر دامنه و زاویه هارمونیک اصلی محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} V_{real} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[ V_k \cos\left(\gamma\pi \frac{N-k}{N}\right) \right] \\ V_{imag} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[ V_k \sin\left(\gamma\pi \frac{N-k}{N}\right) \right] \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{imag}}{V_{real}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

### ۳-۲- روش حداقل مربعات [۴]

در روش حداقل مربعات پس از حضور خطا در سیستم نمونه‌های خطا دریافت می‌شود و با توجه به  $N$  نمونه در یک سیکل و بر اساس معادله زیر دامنه و زاویه هارمونیک

اصلی محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} V_{real} = \sum_{k=1}^M [V_k C_k] \\ V_{imag} = \sum_{k=1}^M [V_k S_k] \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{imag}}{V_{real}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & \dots & C_{M-1} & C_M \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & \dots & D_{M-1} & D_M \end{bmatrix} \rightarrow \quad (4)$$

$$= \text{Inverse}(A^T \cdot A) \cdot A^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\left(-2\pi \frac{1}{N}\right) & \sin\left(-2\pi \frac{1}{N}\right) \\ \cos\left(-2\pi \frac{2}{N}\right) & \sin\left(-2\pi \frac{2}{N}\right) \\ \cos\left(-2\pi \frac{3}{N}\right) & \sin\left(-2\pi \frac{3}{N}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(-2\pi \frac{M-1}{N}\right) & \sin\left(-2\pi \frac{M-1}{N}\right) \\ \cos\left(-2\pi \frac{M}{N}\right) & \sin\left(-2\pi \frac{M}{N}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### ۳-۴- روش حداقل مربعات با حذف مقدار DC

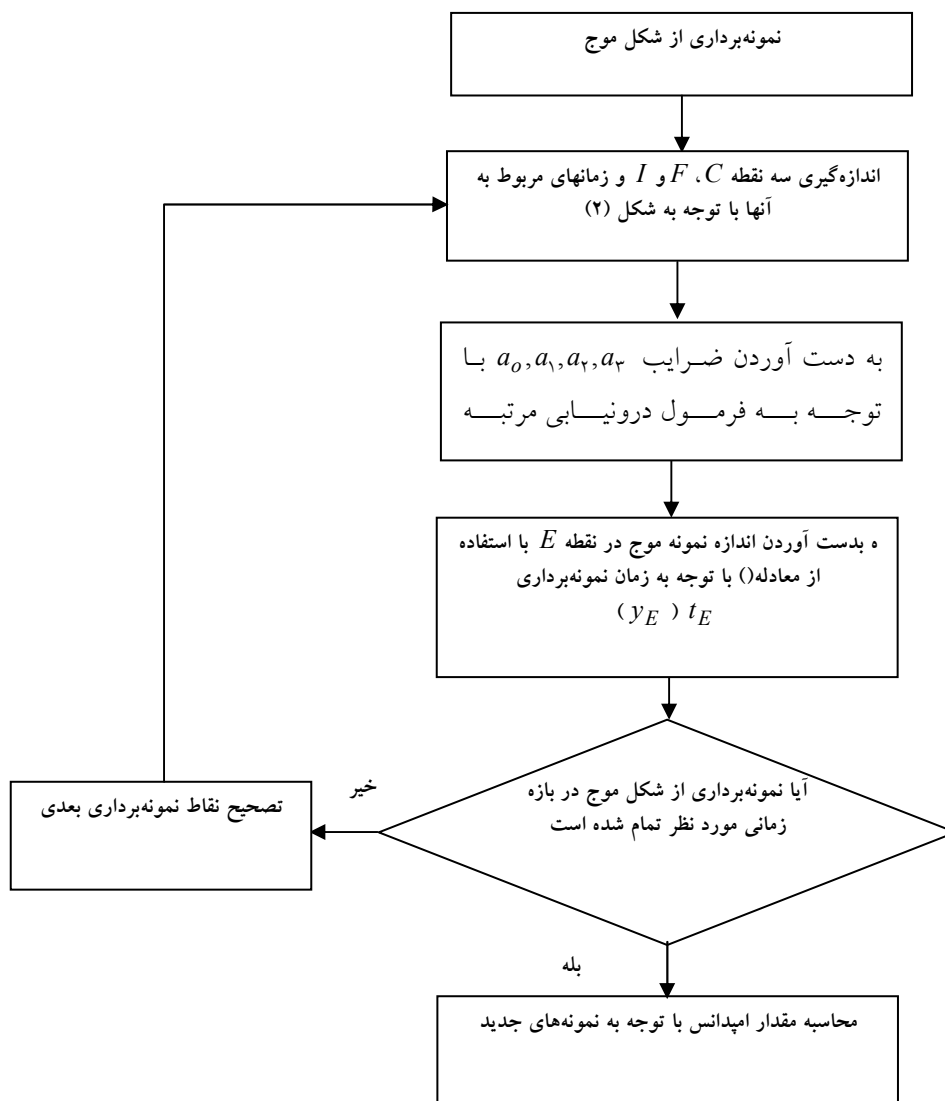
این روش همانند روش حداقل مربعات است با این فرض که مقدار DC موجود در نمونه‌ها را حذف کرده و سپس مقادیر دامنه و فاز را محاسبه می‌کند به‌گونه‌ای که با توجه به  $N$  نمونه در یک سیکل و براساس معادله زیر دامنه و زاویه هارمونیک اصلی محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} V_{real} = \sum_{k=1}^M [V_k C_k] \\ V_{imag} = \sum_{k=1}^M [V_k S_k] \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{imag}}{V_{real}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} C \\ D \\ X \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & \dots & C_{M-1} & C_M \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & \dots & D_{M-1} & D_M \\ X & X & X & X & \dots & X & X \\ X & X & X & X & \dots & X & X \end{bmatrix} \rightarrow \quad (7)$$

$$= \text{Inverse}(A^T \cdot A) \cdot A^T$$





شکل ۳- نمودار جریان‌ی روش درونیابی عددی در الگوریتم‌های حفاظت دیستانس دیجیتال

بخش (۳) توضیح داده شد، برای محاسبه امیدانس به نمونه‌برداری از شکل موج ورودی در زمانهای متفاوت نیاز است. در این محاسبات نرخ نمونه‌برداری ضریبی از بازه زمانی محاسبات نیست، بنابراین با استفاده از روش جدید با به‌کارگیری تکنیک درونیابی درجه سه برای نمونه‌برداری مقدار موج  $V_k$ ، همان‌طور که در بخش (۳) توضیح داده شد، در زمان مورد نظر یعنی زمان واقعی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مقدار دقیق نمونه موج در زمان مورد نظر به محاسبه مقدار موهومی، حقیقی و زاویه هارمونیک اصلی با مقدار دقیق منجر می‌شود. در نتیجه کاهش خطا در نمونه‌برداری را سبب شده و

شده است به‌گونه‌ای که نرم‌افزار PSCAD نمونه‌هایی را با زمان ثابت نمونه‌برداری می‌کند. در واقع PSCAD تحلیل‌های مربوط به شبیه‌سازی را در بازه‌های زمانی ثابت انجام می‌دهد بنابراین اگر نرخ نمونه‌برداری ضریبی از این بازه‌های زمانی نباشد، مسئله‌ای که در ADCها مطرح شد در PSCAD تکرار می‌شود. پس برای شبیه‌سازی این مسئله، از نرم‌افزار PSCAD با نرخ نمونه‌برداری که ضریبی از این بازه زمانی نیست، استفاده شده است.

#### ۲-۴- پیاده‌سازی روش جدید

در بررسی الگوریتم‌های حفاظت دیستانس دیجیتال که در

افزایش دقت محاسبات را به همراه دارد.

می شود. که این خطا در محاسبه امپدانس در لحظه اول بسیار تاثیر گذار است. مقدار شاخص این خطا به صورت زیر تعیین می شود:

$$\text{first\_error} = \int_{t_0}^{t_1} |\text{error}| dt \quad (11)$$

که در معادله بالا error برابر دامنه خطا و  $t_0, t_1$  مدت زمانی است که الگوریتمها با استفاده از ۷ نمونه اول بعد رخداد خطا، به محاسبه امپدانس می پردازند و بیانگر این است که در لحظات اول رخداد، رله چه خطایی را می بیند.

خطای نوع ۲: مجدداً با نگاهی به شکل (۴) می توان دید که همانند خطای نوع اول، تمام حالتها در ۷ نمونه دوم روند مشابهی دارند. بنابراین خطای نوع دوم خطایی است که بعد از اتمام خطای ۱ پیش می آید و با توجه به ۷ نمونه دوم امپدانس محاسبه شده بعد از رخداد اتصال کوتاه در سیستم قدرت می باشد. مقدار شاخص این خطا به صورت زیر تعیین می شود:

$$\text{second\_error} = \int_{t_1}^{t_2} |\text{error}| dt \quad (12)$$

که در معادله بالا  $t_2$  زمان اتمام نمونه برداری از موج اصلی بعد از ۱۴ نمونه است.

- خطای نوع ۳: با توجه به شکل (۴) نتیجه می شود که در تمام حالتها خطایی بعد از اتمام خطای ۲ پیش می آید که به نمونه برداری از شکل موج اصلی بعد از ۱۴ نمونه اول تا یک سیکل پرداخته است. مقدار شاخص این خطا به صورت زیر تعیین می شود:

$$\text{third\_error} = \int_{t_2}^T |\text{error}| dt \quad (13)$$

که در معادله بالا  $T$  دوره تناوب موج اصلی است. این خطا نشان دهنده این است که مجموعاً در سیکل اول که سیکل مهمی است مقدار خطای ایجاد شده چه مقدار است. در واقع این خطا، خطای ماندگار را برای رله نشان می دهد، به علت اینکه رفتار شکل موج در انتهای سیکل اول همانند رفتار شکل موج در حالت ماندگار است.

لازم به توضیح است که خطاهای تعریف شده نوع ۱، ۲ و ۳ مجموع اندازه قدرمطلق خطا در یک دوره از زمان هستند.

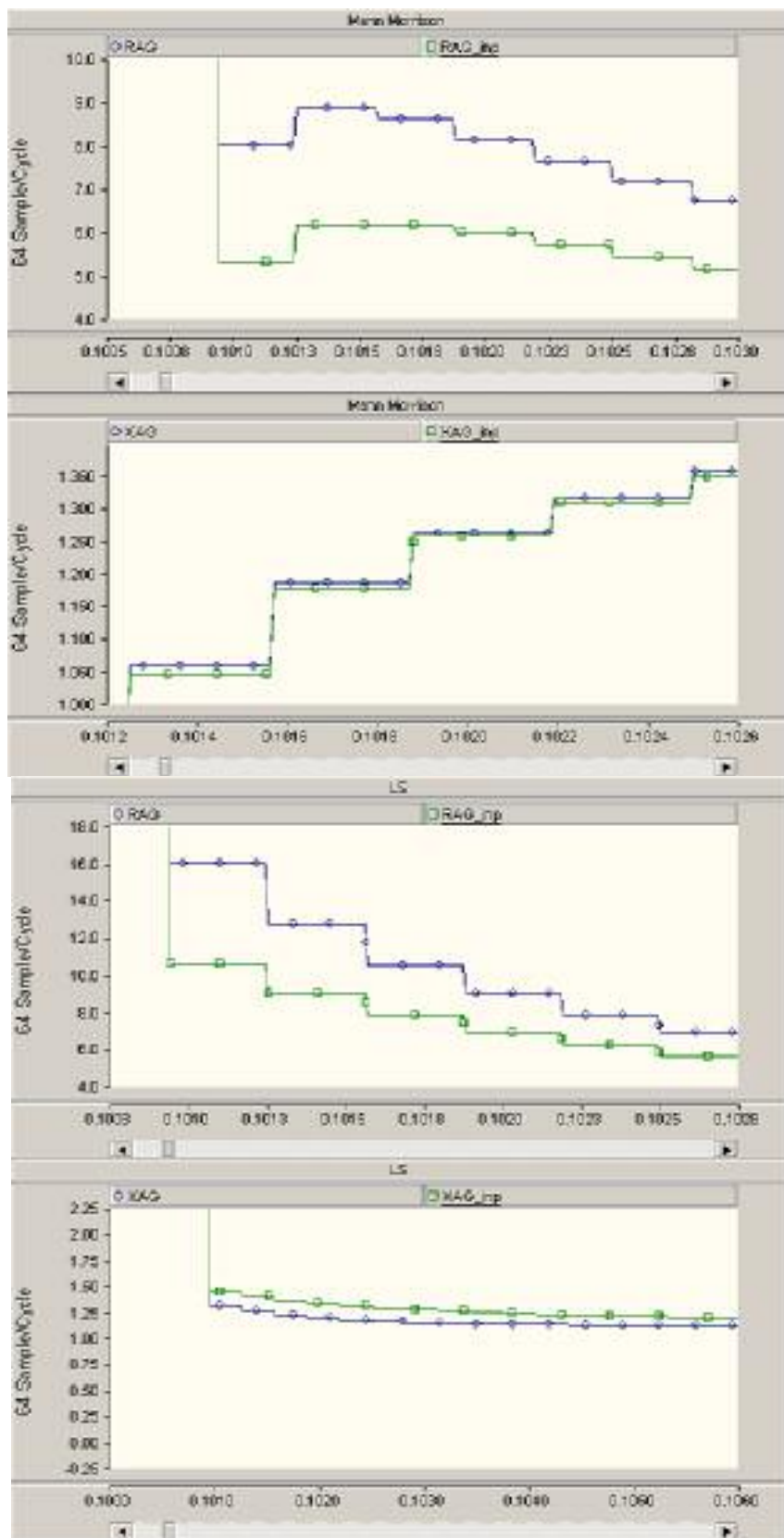
برای این منظور ابتدا با توجه به انتخاب نوع الگوریتم، با تعیین تعداد نمونه برداری از ورودی در یک سیکل، تعیین فرکانس مدار، ضریب  $k$  و وارد کردن امپدانس و ادمیتانس در مواقعی که خطا وجود ندارد و همچنین زمان رخداد خطا می توان دامنه، زاویه و بخش حقیقی و موهومی جریان و ولتاژ و امپدانس را با روش انتخاب شده به دست آورد. همچنین در این بلوک چند پارامتر دیگر مشخص است. در روشهای محاسبه امپدانس به کمک پنجره متغیر (مان موریسون، حداقل مربعات، حداقل مربعات با حذف DC و پرودار ۷۰) نمونه های بعد از خطا استفاده می شود. چون استفاده از چند نمونه اول خطای بالایی برای امپدانس ایجاد می کند و این امر ممکن است باعث عملکرد نادرست رله ها شوند. معمولاً امپدانس به دست آمده را به عددی از صفر تا ۱ تقسیم می کنند که این عدد معمولاً به صورت درصد بیان می شود. به فرض اینکه این ضریب برای ۵ نمونه اول ۵۰٪ و برای ۱۵ نمونه بعدی ۷۵٪ و برای مقادیر بعد از آن ۱۰۰٪ است. این کار باعث کمتر شدن احتمال خطای رله دیستانس برای عملکرد اشتباه می شود.

نمودار جریانی مربوط به روش محاسبه درونیایی درجه ۳ عددی در الگوریتمهای رله دیستانس در شکل (۴) آورده شده است. برای بررسی روش بهینه در مقایسه الگوریتمهای محاسبه امپدانس به تعریف انواع خطاها پرداخته تا نمونه برداری بهینه را بتوان از آن دریافت کرد.

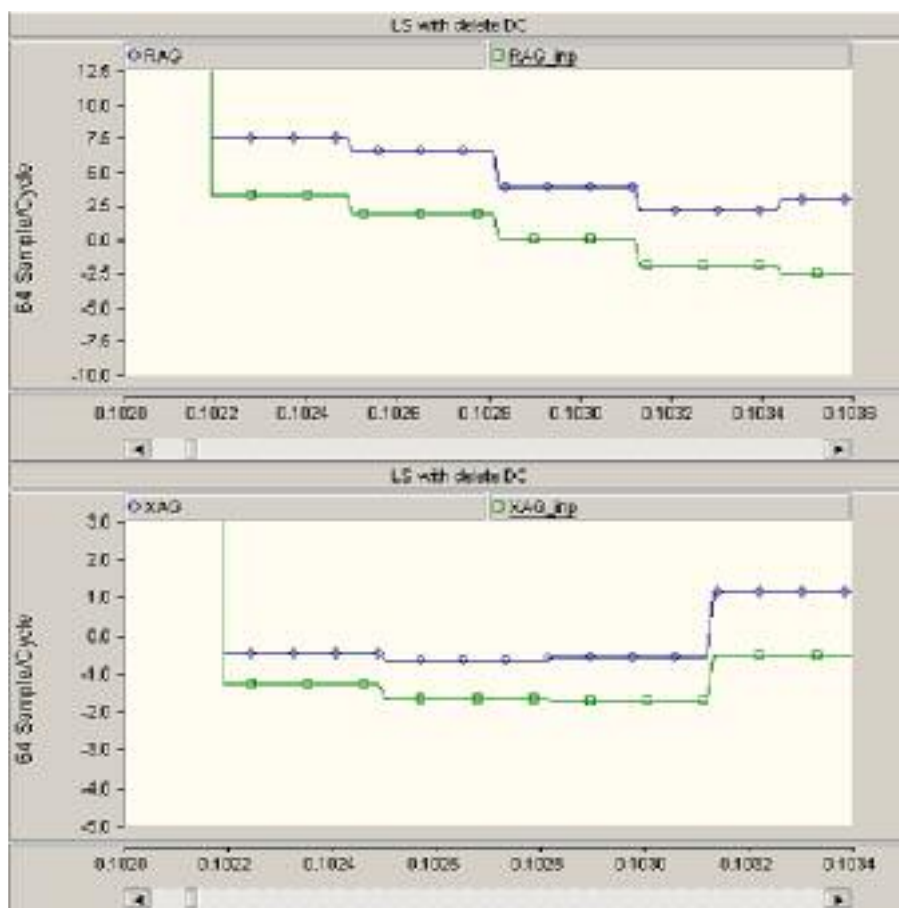
### ۳-۴- خطاهای ایجاد شده در روش عددی درونیایی و تعریف شاخص برای هر خطا

برای دسته بندی دقیقتر خطاها، شاخصهای متفاوتی معرفی می شوند:

- خطای نوع ۱: با بررسی شکل (۴) مشاهده می شود که تقریباً در ۷ نمونه اول تمام حالتها یک روند مشابه دارند. بنابراین خطای نوع اول خطایی است که به خاطر لحظه رخداد اتصال کوتاه در سیستم قدرت در ۷ نمونه اول ایجاد







O محاسبه عادی پارامتر

□ محاسبه پارامتر با استفاده از درون‌یابی

شکل ۴- خروجی امپدانس با ۶۴ نمونه برای روشهای مان‌موریسون، حداقل مربعات، حداقل مربعات با حذف DC

الگوریتم‌هاست.

از آنجایی که تنوع رله‌های حفاظتی بسیار زیاد است و پیشرفت تکنولوژی که اخیراً حاصل شده است، برخی رله‌های خیلی خیلی سریع زودتر از اینکه جریان به پیک جریان یعنی حدود ۲ میلی‌ثانیه و تقریباً ۷-۸ نمونه اول برسد، عمل می‌کنند. این رله‌ها در برخی شبکه‌های ۴۰۰ کیلوولت به کار می‌روند که سرعت عمل از اهمیت زیادی برخوردار است. خطای نوع اول با ۷ نمونه برای این نوع رله‌ها تعریف شده است که خطاهای این نوع رله‌ها را می‌پوشاند زیرا اولاً با دو نمونه اول نمی‌توان دامنه فازور را حساب کرد و حداقل نیاز به سه نمونه است. برای اطمینان از اینکه خطا در ناحیه حفاظتی قرار گرفته است لازم است چند بار خطا محاسبه شود و چنانکه

به عبارت دیگر انتگرال به کار برده شده در واقع متوسط خطا را با یک ضریب محاسبه می‌کند. چون متوسط خطاها برای مقایسه خطا در هر دو روش معمول و پیشنهاد شده به کار رفته است مقدار آن می‌تواند ملاکی برای مقایسه باشد.

سه خطای تعریف شده در بالا برای تعداد ۶۴ نمونه در هر سیکل، برای روشهای مختلف و برای قسمت حقیقی و موهومی امپدانس دیده شده در جدول (۱) آورده شده است که در این جدول،  $e1$ : خطای نوع اول،  $e2$ : خطای نوع دوم،  $e3$ : خطای نوع سوم  $R$ : مقدار حقیقی امپدانس،  $X$ : مقدار موهومی امپدانس هر یک از خانه‌های جدول بیانگر درصد انواع خطای ( $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$ ) به وجود آمده در محاسبه قسمت‌های حقیقی ( $R$ ) و موهومی امپدانس ( $X$ ) بدون استفاده از روش بهینه در انواع

جدول ۱- مقدار خطاها در انواع روشها با ۶۴ نمونه در هر سیکل بدون استفاده از روش بهینه

Error value of 64 sample/cycle (%)						
Index	R			X		
Type \ Error	e1	e2	e3	e1	e2	e3
FFT	۱/۱۶۰۲۸۱	۰/۰۸۷۵۲۷	۰/۰۶۷۸۶۱	۸/۷۶۲۲۲۹	۰/۰۸۸۲۱۳	۴/۳۷۳۳۷۳
H-FFT	۰/۵۸۰۰۲۶	۰/۰۴۳۶۲۶	۰/۳۲۷۰۴۹	۴/۳۸۱۱۱۵	۰/۰۴۴۱۰۸	۴/۳۴۶۲۵۳
LS	۰/۰۹۵۱۵۴	۰/۰۱۷۷۵۹	۰/۰۳۱۷۴۴	۰/۰۶۵۵۹۸	۰/۰۰۴۰۱۳	۴/۵۶۴۰۷۹
Mann-Morrison	۰/۰۸۴۵۳۱	۰/۰۱۹۸۱۴	۰/۰۵۱۴۷۱	۰/۰۶۴۹۷۳	۰/۰۰۴۷۵۱	۴/۲۸۸۶۷۷
LS with delete DC	۰/۰۹۳۶۴۴	۰/۰۱۶۹۳۳	۰/۰۳۸۷۲۴	۰/۰۶۵۳۷۷	۰/۰۰۳۸۱۸	۴/۳۵۸۷۲۲
Prodar70	۰/۰۶۲۷۷۴	۰/۰۰۰۸۹۱	۰/۴۵۸۱۷۲	۰/۰۷۰۶۵۳	۰/۰۱۰۶۳۰	۴/۳۸۰۹۷۸

e1: خطای نوع اول، e2: خطای نوع دوم، e3: خطای نوع سوم R: مقدار حقیقی امیدانس، X: مقدار موهومی امیدانس هر یک از خانه‌های جدول بیانگر درصد انواع خطای (e1, e2, e3) به وجود آمده در محاسبه قسمتهای حقیقی (R) و موهومی امیدانس (X) بدون استفاده از روش بهینه در انواع الگوریتمهاست.

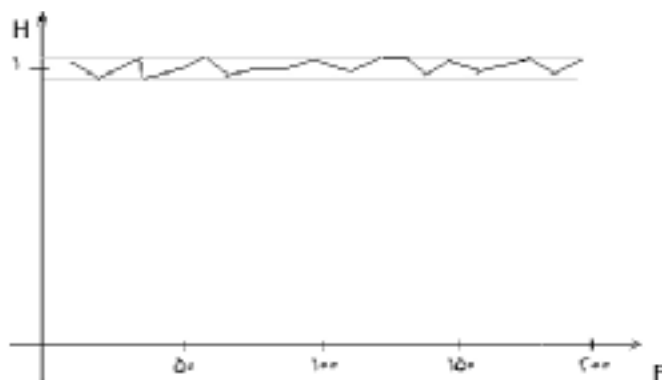
مقدار امیدانس اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه خطای امیدانس محاسبه شده ناشی از سه نمونه اول داخل ناحیه حفاظتی قرار گیرد رله فرمان قطع را صادر نمی‌کند. بلکه بنا به تنظیم زمانی رله بایستی تعداد بیشتری از سه نمونه متوالی گرفته شود تا اطمینان حاصل شود که برای زمان مشخص مثلاً ۱۰ یا ۲۰ میلی‌ثانیه که قبلاً تنظیم شده این امیدانس مستمراً داخل ناحیه حفاظتی قرار دارد. این زمانهای معین شده می‌تواند تصویری از یکی از خطاهای سه‌گانه یاد شده در این بخش ارائه دهد.

در مورد درونیابی و اثر پاسخ فرکانسی می‌توان با درونیابی به صورت یک فیلتر دیجیتال برخورد کرد. پاسخ فرکانسی درونیابی که به کمک اعمال درونیابی به فرکانسهای متفاوت به دست آمده به صورت شکل (۵) است. این شکل نشان می‌دهد که از نظر پاسخ فرکانسی، درونیابی دامنه را بسیار کم جابه‌جا می‌کند به طوری که نوسان در حدود ۳٪ حول نقطه ۱ است. در واقع بدون تکنیک درونیابی نوسانات بسیار کمی بر روی پاسخ فرکانسی در روشهای یاد شده محاسبه امیدانس به‌طور ذاتی وجود دارد. حال اعمال تکنیک درونیابی سبب می‌شود که پاسخ فرکانسی متجه در روشهای مختلف که از طریق ضرب شدن پاسخ فرکانسی نوسانات قبلی در پاسخ فرکانسی درونیابی حاصل می‌شود نوسانات کمتری داشته باشد.

در کلیه حالتها داخل ناحیه حفاظتی بود فرمان قطع صادر شود. بنابراین برای داشتن ۵ بار محاسبه هفت نمونه لازم است. در مرجع [۹] برای تشخیص خطا از ۵ تا ۷ نمونه استفاده شده است. خطاهای نوع دوم برای رله‌های با زمان عملکرد حدود ۴ میلی‌ثانیه است که قبل از رسیدن به پیک جریان عمل می‌کنند. این خطا با ۱۴ نمونه محاسبه می‌شود [۱۰]. برای رله‌های سریع و معمولی‌اند که با نصف سیکل نمونه برداری عمل می‌کنند خطای نوع سوم تعریف شده است.

البته برخی از این رله‌ها که خطای نوع سوم کاربرد دارد، عمدتاً از نوع معمولی‌اند که توسط دستگاه آزمون جامع رله‌ها که در آزمایشگاه حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر توسعه داده شده است برای رله‌های متعدد آزمون شده است [۱۱]. بنابراین برای رله‌های خیلی خیلی سریع خطای نوع اول و خیلی سریع خطاهای نوع دوم و سایر رله‌ها سوم مدنظر است. یعنی زمان عملکرد رله با یکی از خطاهای محاسبه شده در پرورد زمانی تطبیق دارد. لذا این نوع خطا می‌تواند بیانگر میزان خطا به‌هنگام عملکرد باشد.

لازم به توضیح است که زمان عملکرد رله دیستانس مطابق سه نمونه یا چند نمونه‌ای نیست که بر اساس آن الگوریتم کار می‌کند. برای مثال در روش پرودار ۷۰ که براساس سه نمونه



شکل ۵- پاسخ فرکانسی درونیایی

## ۵- شبیه‌سازی و تحلیل برنامه

### ۱-۵- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی و تحلیل روش بهینه در الگوریتمهای دیستانس و برای مطالعه سیستم قدرت در مواجهه با محاسبات سیستمها از نرم‌افزار PSCAD استفاده شده است. یکی از علل استفاده از این نرم‌افزار به جای نرم‌افزارهای مشابه این است که تعریف بلوکهای جدید در این نرم‌افزار بسیار ساده است، به طوری که می‌توان هر بلوکی را با قابلیت‌های موردنظر و با تعداد دلخواه، ورودی و خروجی طراحی و برنامه‌نویسی کرد. همچنین این نرم‌افزار از قابلیت‌های برنامه‌نویسی در محیط فرتن استفاده می‌کند. از آنجایی که روابط حاکم بر این روشها کمی پیچیده‌اند، ساختن بلوک متناسب با آن در نرم‌افزار PSCAD محیط را برای مطالعه سریع و آسان فراهم می‌آورد.

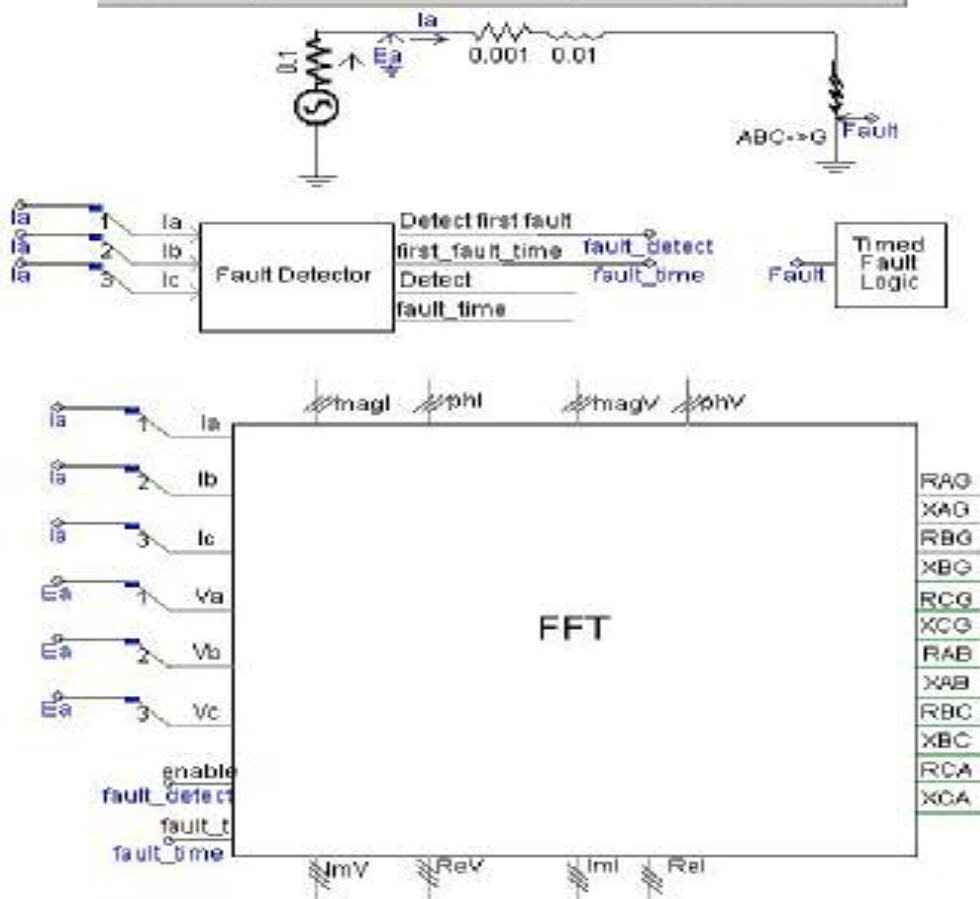
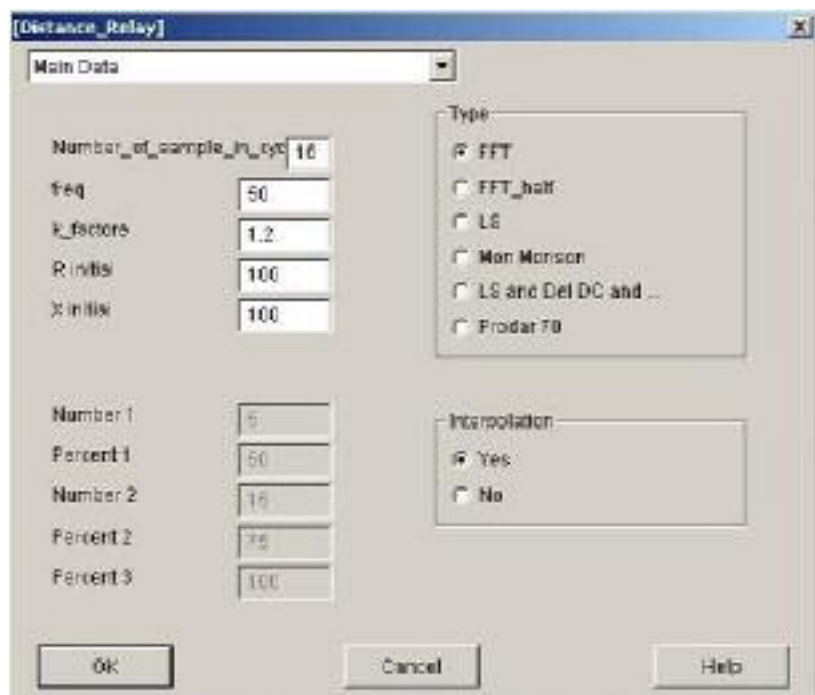
از طرفی فاصله‌زمانی تحلیلهای برنامه در این مقاله روی  $1,25\mu s$  تنظیم شده است. این بدان معنی است که در مقایسه با A/D های ۱۲ بیتی که فاصله هر تغییر در بیت کم‌ارزش حدوداً  $\frac{5v}{2^{12}} \times 5ms = 1.25\mu s$  است برابری می‌کند. از این رو برای محاسبه امپدانس و پیاده‌سازی روشها، بلوکی به صورت شکل (۶) در PSCAD طراحی شده است که در این شکل، جدول مربوط به متعلقات بلوک محاسبه امپدانس آورده شده و همچنین بلوک آشکارساز خطا به همراه بلوک محاسبه امپدانس و مدار نمونه آزمون آورده شده است.. روند پیاده‌سازی برنامه به صورت زیر می‌باشد:

برای به‌دست آوردن سیگنالهای واقعی خطا و هر چه واقعیت شدن نتایج، از یک شبکه قدرت ساده، به صورت شکل (۶) استفاده شده است.

در این مدار برای شبیه‌سازی خطای به‌وجود آمده در شبکه، یک بلوک آشکارساز خطا طراحی شده است. روند کار این آشکارساز خطا بدین صورت است که با به‌کارگیری روش مقایسه میانگین دامنه‌های سه جریان در هر لحظه با میانگین دامنه‌های جریان در یک سیکل قبل، زمان خطا تشخیص داده می‌شود. در این مدار برای کارکرد و شبیه‌سازی، یک خطای تک‌فاز در لحظه  $0,1$  ثانیه پیش می‌آید.

### ۲-۵- نتایج و تحلیل

همان‌طور که در بخش (۵-۱) توضیح داده شد فاصله زمانی تحلیلهای برنامه در این مقایسه در نرم‌افزار شبیه‌سازی PSCAD برای  $1,25\mu s$  تنظیم شده است. همچنین در همان قسمت تشریح شد که این تنظیم با یک A/D ۱۲ بیتی که فاصله هر تغییر هر بیت کم ارزش آن حدود  $1,25\mu s$  است تطبیق دارد. بنابراین تحلیل و مقایسه آورده شده در جدول (۱) که خروجی نرم‌افزار شبیه‌سازی شده در PSCAD است مربوط به یک A/D واقعی ۱۲ بیتی است. در جدول (۱) مقادیر مربوط به خطای محاسبات قسمت حقیقی و موهومی امپدانس در قیاس با امپدانس واقعی، با نرخ ۶۴ نمونه در سیکل، برای تمامی روشها آورده شده است. اگرچه میزان خطای کم در دستگاههای تشخیص محل خطا که خود



شکل ۶- مدار پیاده‌سازی بلوک محاسبه امپدانس به همراه یک شبکه

امپدانس اندازه‌گیری و نهایتاً محل خطا مدنظر است این خطای کم دارای اهمیت چندانی نیست ولی برای رله‌های دیستانس که بحث عملکرد (فرمان قطع دادن به کلیدها و قطع شدن مدار) مطرح است میزان خطای کم هم دارای اهمیت است.

از طرف دیگر در مطالعه مربوط به چگونگی محاسبه امپدانس حتی اگر خطای کمی وجود داشته باشد کاهش بیشتر خطا در اندازه‌گیری و محاسبه امپدانس سبب افزایش دقت می‌شود.

جدول (۲) مقادیر مربوط به خطای محاسبات قسمت حقیقی و موهومی امپدانس در قیاس با امپدانس واقعی، با نرخ ۶۴ نمونه در سیکل با به‌کارگیری روش بهینه‌ای که در بخش (۴) گفته شد، برای تمامی روشها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در جدول (۳)، درصد کاهش خطای محاسبه امپدانس، برای مقادیر ذکر شده در جدول (۲)، محاسبه شده است.

قبل از پرداختن به تحلیل نتایج و اینکه تکنیک این مقاله بر روی هر یک از الگوریتمهای محاسبه امپدانس چه میزان تاثیر دارد، در این تحلیل در هر روش دو حالت یعنی یکبار با به‌کارگیری تکنیک درونیابی که موضوع این مقاله است و یکبار بدون تکنیک درونیابی مقایسه صورت گرفته است. هدف اصلی مقاله مقایسه روشهای مختلف با یکدیگر نبوده بلکه تاثیر تکنیک یاد شده بر هر روش است. با توجه به این موضوع اگرچه برای روشهایی نظیر مان‌موریسون و پرودار ۷۰ که اساساً به‌طور ذاتی دارای سرعت بالا و دقت کمی هستند، نشان داده می‌شود که دقت کم قبلی بهبود یافته است. در خصوص الگوریتمهایی چون فوریه که خود ذاتاً دارای دقت بیشتری هستند نیز نسبت به وضعیتی که این تکنیک به‌کار نرفته است به دلیل افزایش دقت، بهبود حاصل شده است. همچنین برای روش پنجره متغیر یعنی حداقل مربعات با حذف DC که دقتها نسبت به روشهای دیگر بالاتر است نیز اعمال تکنیک یاد شده را از آنچه موجود است بالاتر می‌برد.

نکته قابل ذکر اینکه برای محاسبه دقیق هر نمونه در

زمان  $t$  به اندازه  $T$  (پریود نمونه برداری) تاخیر وجود دارد. این تاخیر در روشهای من‌موریسون، پرودار ۷۰، حداقل مربعات، حداقل مربعات با حذف DC ذاتاً موجود است. به‌طور کلی این تاخیر که سبب عدم دقت می‌شود به یک میزان برای دو حالتی که تکنیک این مقاله اعمال شده و نشده باشد موجود است. یعنی روش درونیابی تاثیری در این موضوع ندارد.

با توجه به این جداول می‌توان دریافت که در روش FFT و H-FFT حدود ۴۸٪ برای قسمت حقیقی امپدانس و ۷۰٪ برای قسمت موهومی امپدانس خطای نوع اول، جدول (۳)، نسبت به حالت بدون استفاده از روش بهینه کاهش یافته است. این مسئله از این حیث حائز اهمیت است که خطای نوع اول که مربوط به نمونه‌های اولیه بعد از رخداد خطا در مدار است، در روشهای با پنجره ثابت، به‌طور چشمگیری کاهش یافته است.

در خطای نوع سوم در اکثر روشها چون مدار به حالت پایدار رسیده است، بنابراین درونیابی تاثیر کمتری نسبت به خطاهای دیگر دارد، جداول (۳) و (۴)، که در جدول (۴) هر یک از خانه‌های جدول بیانگر میانگین درصد کاهش انواع خطای ( $e_1, e_2, e_3$ ) به‌وجود آمده در محاسبه قسمت‌های حقیقی ( $R$ ) و موهومی امپدانس ( $X$ ) و قسمت حقیقی و موهومی با به‌کارگیری روش بهینه در انواع الگوریتمهاست. و به‌طور میانگین در تمامی روشها حدوداً ۴٫۲٪ می‌باشد.

خطای نوع اول تقریباً در تمامی روشها با استفاده از روش بهینه کاهش یافته است. همان‌طور که در جداول (۳) و (۴) مشاهده می‌شود، این نوع خطا با به‌کارگیری درونیابی به‌طور میانگین ۲۲٪ کاهش داشته است. یعنی اینکه با استفاده از این تکنیک دقت محاسبه تقریباً ۴ برابر شده است. چون این مقدار در نمونه‌های اولیه است بنابراین در عملکرد رله بسیار تاثیرگذار است.

با توجه به جدول (۵) این نتیجه برداشت می‌شود که در

جدول ۲- مقدار خطاها در انواع روشها با ۶۴ نمونه در هر سیکل با استفاده از روش بهینه

Error value of _64 sample/cycle_ in new method (%)						
Index	R			X		
Type \ Error	e1	e2	e3	e1	e2	e3
FFT	۰/۰۵۹۶۲۲۲	۰/۰۷۲۷۰۳	۰/۰۶۳۹۰۹	۲/۶۰۹۷۵۳	۰/۰۶۲۵۵۰	۴/۳۷۲۳۳۱
H-FFT	۰/۳۰۱۸۸۶	۰/۰۳۶۲۷۰	۰/۳۲۴۷۹۴	۱/۳۰۵۴۰۹	۰/۰۳۱۲۹۵	۴/۳۴۶۳۳۵
LS	۰/۰۸۴۷۷۸	۰/۰۱۴۳۰۶	۰/۰۳۷۵۳۲	۰/۰۶۵۷۵۲	۰/۰۰۴۱۸۲	۴/۳۵۱۹۹۷
Mann-Morrison	۰/۰۷۷۹۴۱	۰/۰۱۵۳۸۷	۰/۰۴۴۱۹۹	۰/۰۶۴۹۵۰	۰/۰۰۴۷۳۴	۴/۲۸۹۰۸۴
LS with delete DC	۰/۰۸۴۷۷۸	۰/۰۱۴۳۰۶	۰/۰۳۳۷۵۳۲	۰/۰۶۵۷۵۲	۰/۰۰۴۱۸۲	۴/۳۵۱۹۹۷
Prodar70	۰/۰۶۲۲۵۳	۰/۰۰۰۶۶۲	۰۲۶۹۳۳۶	۰/۰۷۰۰۳۰	۰/۰۰۹۹۸۴	۴/۳۸۲۱۶۳

جدول ۳- درصد کاهش انواع خطاها در روشهای مختلف با به کارگیری روش بهینه

Decrease error value of _64 sample/cycle (%)_ in new method						
Index	R			X		
Type \ Error	e1	e2	e3	e1	e2	e3
FFT	۴۸/۶۱۴۰۳۱	۱۶/۹۳۶۷۵۶	۵/۸۲۳۳۰۷	۷۰/۲۱۵۸۷۶	۲۹/۰۹۲۳۵۳	۰/۰۲۳۸۳۴
H-FFT	۴۷/۹۵۳۰۵۸	۱۶/۸۶۱۵۰۸	۰/۶۸۹۲۴۷	۷۰/۲۰۳۷۳۴	۲۹/۰۴۹۷۵۸	-۰/۰۰۱۸۷۸
LS	۱۰/۹۰۴۲۰۵	۱۹/۴۴۲۵۳	۱۸/۲۳۰۲۸۶	-۰/۲۳۴۱۳۷	۴/۲۱۳۷۴۲	۴/۴۹۳۴۰۱
Mann-Morrison	۷/۷۹۵۵۱۳	۲۲/۳۴۳۱۹۹	۱۴/۱۲۸۶۴۶	۰/۰۳۵۰۴۰	۰/۳۵۸۷۴۳	-۰/۰۰۹۴۹۷
LS with delete DC	۹/۴۶۷۸۶۴	۱۵/۵۱۲۲۴۸	۳/۰۷۹۷۸۹	-۰/۵۷۳۶۲۶	۹/۵۳۶۷۶۳	-۰/۰۰۶۳۰۳
Prodar70	۰/۸۲۹۹۱۸	۲۵/۶۷۱۰۱۳	۴۱/۲۱۵۰۴۸	۰/۸۸۲۴۳۵	۶/۰۷۶۴۹۳	-۰/۰۲۷۰۵۴

جدول ۴- میانگین درصد کاهش انواع خطاها در روشهای مختلف با به کارگیری روش بهینه

Decrease Error Average (%)			
Error	e1	e2	e3
Average_Decrease_Error_R	۲۰/۹۲۷۴۳۱	۱۹/۴۶۱۴۹۶	۷/۷۸۴۲۹۲
Average_Decrease_Error_X	۲۳/۴۲۱۵۵۴	۸/۴۷۱۱۴۰	۰/۷۴۵۴۱۷
Average_Decrease_Error_R&X	۲۲/۱۷۴۴۹۲	۱۳/۹۶۶۳۱۸	۴/۲۶۴۸۵۴

جدول ۵- میانگین درصد کاهش کل خطاها در روشهای مختلف با به کارگیری روش بهینه

Decrease Error Average (%)						
Type	FFT	H-FFT	LS	Mann-Morrison	LS with delete DC	Prodar70
Total_Decay_Error_Average	۲۸/۴۵۱۰۲۶	۲۷/۴۵۹۲۳۸	۲/۰۲۷۲۸۲	۷/۴۴۱۹۴۰	۲/۹۹۰۵۳۵	۱۲/۴۴۱۳۰۹

همان طور که از جداول (۱) و (۲) بر می آید هم خطاهای کم و هم خطاهای زیاد وجود دارد. برای مثال X و R عمدتاً در خطای نوع دوم کوچک و خطاهای نوع اول مربوط به مقدار X برای روشهای DFT و H-DFT بزرگاند. همچنین خطاهای نوع سوم برای کلیه روشها نسبتاً زیاد است. استفاده از روش درونیابی سبب کاهش همه خطاهای مربوطه شده است که خود کارایی روش را می رسانی. برای خطاهای نوع اول که برای رله های خیلی سریع جدید قابل اعمال است. میزان خطا همان طور که از جداول (۱) و (۲) بر می آید در روش DFT و H-DFT، ۸،۷۶ و ۴،۳ درصد است که قابل توجه بوده و با به کارگیری تکنیک جدید به ترتیب ۲،۶ و ۱،۳ درصد کاهش یافته است یعنی کاهشی به میزان حدود ۷۰٪.

روشهای با پنجره متغیر بهترین کاهش خطا در حالت استفاده از روش بهینه نسبت به حالت عادی را روش پرودار ۷۰ و سپس روش مان موریسون داشته اند، که در جدول (۵)، هر یک از خانه های جدول بیانگر میانگین کلی درصد کاهش انواع خطای (e1، e2، e3) به وجود آمده در محاسبه امپدانس با به کارگیری روش بهینه در انواع الگوریتمهاست. البته در تمام روشهای با پنجره متغیر این کاهش خطا به وجود آمده و به طور میانگین حدود ۶،۲۲٪ است.

همچنین در روشهای با پنجره ثابت میانگین کاهش خطا از حالت بدون استفاده از روش بهینه نسبت به زمانی که از این روش استفاده می شود بیشتر از روشهای با پنجره متغیر بوده و در حدود ۲۸٪ است، این بدان معناست که در محاسبه امپدانس دقت حدوداً ۳ برابر شده است، جدول (۵).

شاخص تعیین دقت اعمال تکنیک یاد شده در نظر گرفته شده‌اند. تکنیک مذکور بر روی ۶ نوع الگوریتم فوریه تمام سیکل، فوریه نیم سیکل، حداقل مربعات، حداقل مربعات با حذف DC، مان موریسون و پرودار 70 آزمایش شده است و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش متداول اندازه‌گیری امپدانس یعنی بدون اینکه تکنیک مذکور اعمال شده باشد، مقایسه شده‌اند.

نتایج این مقایسه نشانگر آن است که تکنیک مذکور به‌طور مؤثری به دقت امپدانس اندازه‌گیری کمک می‌کند. به‌طور کلی در این مقاله کارایی روش در محاسبه امپدانس دقیق رله دیستانس اثبات شده است.

امپدانس خطا، امپدانس از دو قسمت راکتانس و مقاومت اسمی تشکیل شده است که برای خطوط انتقال که رله‌های دیستانس بر روی آنها قرار دارد راکتانس بخش عمده امپدانس را تشکیل می‌دهد. میزان خود خطا برای راکتانس برای روشهای FFT و H-FFT، ۸٫۷۶ و ۴٫۳۸ است و مقدار مینیمم برای روشهای دیگر حدود ۰٫۰۶۵ است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش درونیابی درجه ۳ برای یافتن امپدانس دقیق در الگوریتم دیستانس استفاده شده است. سه نوع خطا با توجه به رله‌های دیجیتالی موجود تعریف شده است و این نوع خطاها به‌عنوان

## واژه‌نامه

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. analog to digital converter(ADC)         | 5. least square(LS)           |
| 2. digitize                                 | 6. least square with delet DC |
| 3. fast fourier transform(FFT)              | 7. Mann Morrison              |
| 4. half cycle fast fourier transform(H-FFT) | 8. Prodar70                   |

## مراجع

- Sanaye-Pasand, M., and Davarpanah, M., "Performance Evaluation of an Extended Adaptive Distance Relaying Algorithm," *Developments in Power System Protection, Eighth IEE International Conference*, Vol. 2, PP: 449 – 452, April 2004.
- Tarlochan S., and Sidhu et al., "An Adaptive Distance Relay and its Performance Comparison With a Fixed Data Window Distance Relay," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, Issue.3, PP: 691-697, July 2002.
- Sachdev, M. S. Ghotra D. S., and Sidhu T. S. "Design of a Distance Relay Using Adaptive Data Window Filters," *IEEE Canadian Conference*, Vol. 2, PP: 610 – 614, Issue, 2000.
- Khorashadi-Zadeh, H., and Daneshi, H., "Evaluation and Performance Comparisons of Digital Distance Protection Algorithms," *Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE*, Vol. 4, PP: 2463–2468, Oct. 2004.
- Liancheng Wang, "Frequency Responses of Phasor-Based Microprocessor Relaying Algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 1, January 1999.
- Torkaman, H., Abyaneh, H.A., Afjei, E., Razavi, F., and Chabanlo, R.M., "The Effect of Sampling Rate in Digital Distance Relay Algorithms," *First Power Systems Protection & Control Conference*, 20-21 Dec., Tehran, Iran, 2006.
- Walt Kester, *Mixed-Signal and DSP Design Techniques Analog Devices*, Inc., Published Newnes, 2002.
- Godara, L. C., *Smart Antennas* CRC Press, 2004.
- Sachdev, M. S. Ghotra, D. S. and Sidhu, T. S. "Design of a Distance Relay Using Adaptive Data Window Filters," *Electrical and Computer*



*Engineering, Canadian Conference*, Vol. 2, PP: 610 – 614, 2000.

10. Tarlochan, S. Sidhu, Daljit, S. Ghotra, and Mohindar S. Sachdev, "An Adaptive Distance Relay and its Performance Comparison With a Fixed Data Window Distance Relay," *IEEE*

*Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 3. July 2002.

۱۱. "دستورالعمل دستگاه تست جامع رله‌ها،" دانشگاه

صنعتی امیرکبیر، مردادماه ۸۶.