

## حفاظت خطوط انتقال مجهز به IPFC با استفاده از امواج سیار

سیدمحمد هاشمی      مهرداد طرفدارحق      هیرش سیدی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز

تبریز - ایران

واژه های کلیدی : FACTS, IPFC, امواج سیار، تبدیل موجک

### چکیده

مطالعه و بررسی تأثیر سیستمهای انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر<sup>1</sup> (FACTS) در حفاظت خطوط انتقال، بدلیل تغییراتی که این سیستمها در امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس ایجاد می کنند، از اهمیت بالائی برخوردار است. یکی از انواع این سیستمها، کنترل کننده جریان توان میان خط<sup>2</sup> (IPFC) است که در سیستمهای انتقال چندخطه، امکان کنترل توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط را بطور همزمان و مستقل از هم فراهم می آورد. فرآیند تزریق ولتاژ سری در هر یک از خطوط توسط IPFC، یک قابلیت جبرانسازی سری پیشرفته در خطوط منشعب از شینه مجهز به IPFC را فراهم می سازد که بسته به میزان جبرانسازی سری در هر یک از خطوط، امکان افزایش یا کاهش ناحیه تحت پوشش رله دیستانس آن خط و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی را فراهم می سازد. بنابراین استفاده از یک طرح حفاظتی مناسب در این مورد لازم است. در این مقاله، استفاده از امواج سیار به عنوان راه حلی برای حفاظت خطوط انتقال

مجهز به IPFC پیشنهاد شده و کارایی آن با شبیه سازی نشان داده شده است.

### 1. مقدمه

سیستم حفاظت دارای نقشی کلیدی در حفظ پایداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستمهای قدرت است. وظیفه یک سیستم حفاظت، تشخیص سریع شرایط غیرعادی در سیستم قدرت و انجام اعمال اصلاحی بمنظور برگرداندن سیستم قدرت به شرایط عادی است. لذا ویژگی مهم یک سیستم حفاظت، سرعت عمل بالا بوده و زمان معمول مورد نیاز برای عملکرد یک سیستم حفاظت در حد چند میلی ثانیه است [1]. سیستم حفاظت باید همه اجزای سیستم قدرت از قبیل ژنراتورها، باس بارها، خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و . . . را تحت پوشش قرار دهد. یکی از اجزای مهم سیستم قدرت، خط انتقال است که وظیفه رساندن انرژی از تولید کننده به مصرف کننده را بر عهده دارد. حفاظت خطوط انتقال توسط رله های دیستانس و جریان زیاد انجام می شود. رله دیستانس از طریق اندازه گیری امپدانس مسیر بین محل قرارگیری رله و محل وقوع اتصال کوتاه، وقوع خطا را تشخیص می دهد. در حالیکه رله جریان زیاد از طریق اندازه گیری جریان عبوری از

1. Flexible AC Transmission Systems (FACTS)
2. Interline Power Flow Controller (IPFC)

کنترل همزمان و مستقل از هم توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال ارائه می‌دهند. در این مقاله تأثیر یکی از این تجهیزات یعنی IPFC بر عملکرد رله دیستانس و کارایی روش حفاظت خط انتقال با استفاده از تئوری امواج سیار در این مورد بررسی شده است. این روش حفاظت که به حفاظت مافوق سریع<sup>7</sup> نیز موسوم است، هر چند بحث تازه‌ای نیست، اما استفاده از آن در خطوط انتقال مجهز به IPFC برای اولین بار است که در این مقاله پیشنهاد شده و مقالات منتشر شده تا کنون، همانند مرجع [13]، صرفاً به بررسی تأثیر IPFC در عملکرد رله دیستانس پرداخته و روشی برای حل مشکل ارائه نداده‌اند. با توجه به اینکه در این روش امیدانس سری خط انتقال اساساً نقشی ندارد، لذا استفاده از آن در مورد انواع دیگر کنترل‌کننده‌های FACTS نیز امکان‌پذیر است.

## 2. اصول عملکرد IPFC

IPFC یک جبران‌کننده و کنترل‌کننده مؤثر پخش توان در سیستم‌های انتقال چند خطه است که از تعدادی اینورتر با لینک DC مشترک تشکیل شده است (شکل 1-الف). هر یک از اینورترها در نقش جبران‌کننده سنکرون سری استاتیکی (SSSC) برای هر یک از خطوط انتقال عمل می‌کند. وجود لینک DC مشترک، امکان تبادل توان اکتیو بین اینورترها و در نتیجه خطوط انتقال را فراهم می‌سازد. از آنجا که هر اینورتر قابلیت جبران‌سازی توان راکتیو را نیز دارد، IPFC قادر به کنترل همزمان توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال بصورت مستقل از یکدیگر است. این قابلیت IPFC موجب متعادل کردن جریان توان اکتیو و راکتیو بین خطوط و انتقال توان از خطوط دارای اضافه بار به خطوط زیر بار نامی، جبران افت ولتاژ راکتیو در طول خطوط انتقال و افزایش پایداری سیستم در برابر اغتشاشات دینامیکی می‌شود.

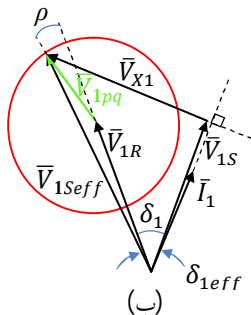
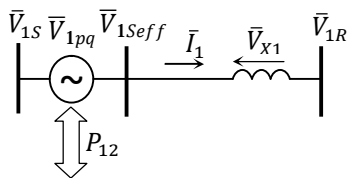
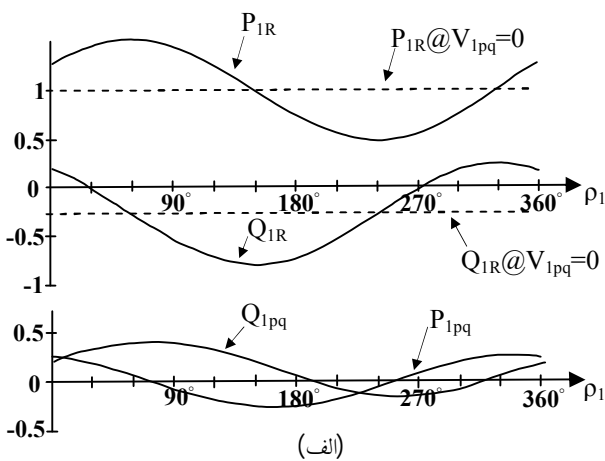
برای تشریح عملکرد IPFC یک سیستم متشکل از 2 خط انتقال را همانند شکل 1-ب در نظر می‌گیریم. اینورترهای پشت-به-پشت تشکیل دهنده IPFC با منابع ولتاژ سری  $V_{1pq}$  و  $V_{2pq}$  مدل شده‌اند. پیکان دوطرفه در شکل مذکور

خط و مقایسه آن با یک مقدار از قبل تنظیم شده عمل می‌کند. با توجه به مزایای متعدد رله‌های دیستانس نسبت به رله‌های جریان زیاد، از آنها به عنوان حفاظت اصلی خطوط انتقال استفاده شده و رله‌های جریان زیاد وظیفه پشتیبانی رله‌های دیستانس را بر عهده دارند. با ورود ادوات الکترونیک قدرت به صنعت برق، انقلاب بزرگی در بخشهای مختلف تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی ایجاد شد که نمونه بارز آن در بخش انتقال، سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) بود. ورود ادوات FACTS در سیستم‌های انتقال سستی باعث ایجاد تأثیراتی در عملکرد رله‌های دیستانس می‌شود که باید برای حل آن چاره‌ای اندیشید. این تأثیرات بر حسب نوع کنترل‌کننده FACTS متفاوت بوده و در مقالات زیادی بررسی شده‌اند. به عنوان مثال در [2]-[8]، تأثیر ادوات FACTS موازی شامل جبران‌ساز وار استاتیکی<sup>1</sup> و جبران‌کننده سنکرون استاتیکی<sup>2</sup> در افزایش برد<sup>3</sup> و کاهش برد<sup>4</sup> رله دیستانس و سیستم‌های حفاظتی از راه دور<sup>5</sup> بررسی شده و پیشنهادهای همچون استفاده از روشهای تطبیقی در تعیین حدود مشخصه‌های چهارگوش، تشابه اثر جبران‌کننده سنکرون استاتیکی با تأثیرات ناشی از تغذیه خط از منابع مختلف<sup>6</sup> در امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس و اصلاح روشهای منطقی تشخیص اتصال کوتاه در حفاظت از راه دور ارائه شده است. در زمینه ادوات FACTS سری با توجه به سابقه طولانی‌تر جبران‌سازی خط انتقال توسط خازنهای سری نسبت به تجهیزاتی مثل خازن سری کنترل‌شونده با تایریستور (TCSC) و جبران‌ساز سنکرون سری استاتیکی (SSSC) و تأثیر بیشتری که این تجهیزات نسبت به تجهیزات FACTS موازی بر امیدانس سری خط انتقال می‌گذراند، بیشتر کار شده است [9]-[12]. تجهیزات FACTS سری-موازی شامل UPFC و IPFC راه‌حل جامعی را برای

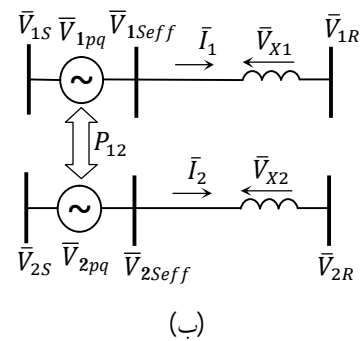
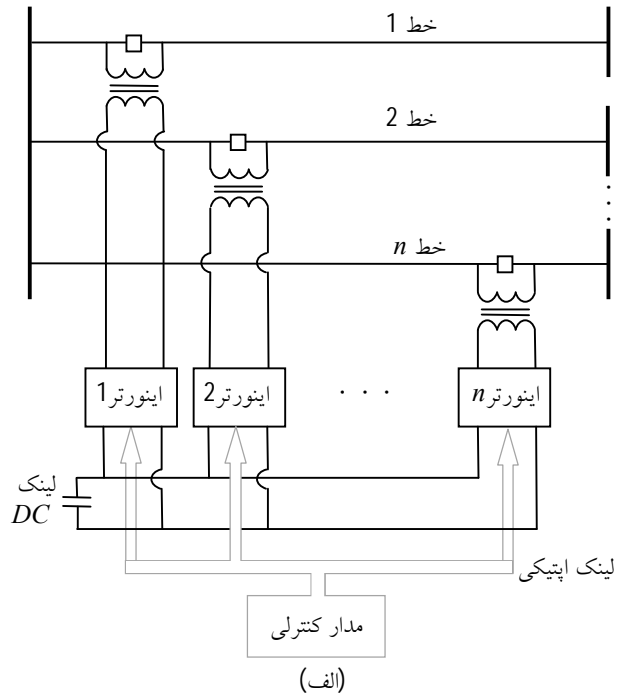
1. Static VAR Compensator (SVC)
2. Static Synchronous Compensator (STATCOM)
3. Over-reach
4. Under-reach
5. Pilot Protection
6. Infeed

و فقط توان راکتیو آن قابل کنترل است. عملکرد اینورتر 2 به گونه‌ای است که باعث برقراری رابطه (1) و تثبیت ولتاژ لینک DC می‌شود. شکل 2 دیگرام فازوری و تغییرات توان شین گیرنده در خط 1 را با فرض اینکه راکتانسهای سری خطوط 1 و 2  $X_1 = X_2 = 0.5 \text{ pu}$  و اندازه ولتاژ شینه‌های فرستنده و گیرنده هر دو خط برابر 1 pu باشد، نشان می‌دهد [14]. حداکثر مقدار ولتاژ سری قابل تزریق در هر خط توسط SSSC با توجه به ظرفیت نامی<sup>1</sup> آن تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} 0 < |V_{pq}| < |V_{pqmax}| \\ 0^\circ < \rho < 360^\circ \end{cases} \quad (2)$$



شکل 2. (الف) تغییرات توانهای اکتیو و راکتیو سمت گیرنده و (ب) دیگرام فازوری خط اول در شکل 1-ب



شکل 1. (الف) طرح کلی IPFC، (ب) مدلسازی IPFC در یک سیستم انتقال دو خطه

نشانگر لینک DC است که قابلیت تبادل توان اکتیو بین منابع ولتاژ را فراهم می‌سازد. از آنجا که در عمل از یک یا چند خازن به عنوان لینک DC استفاده می‌شود، ولتاژ سمت DC باید در یک مقدار معین تثبیت شود. به این منظور جمع جبری توان اکتیو مبادله شده بین خطوط باید صفر شود:

$$P_{12} = P_{1pq} = P_{2pq} \quad (1)$$

برای برقراری رابطه (1) باید اینورتر یکی از خطوط را مسئول صفر کردن توان اکتیو خالص مبادله شده در لینک DC قرار داد. در اینجا اینورتر خط 1 به عنوان اینورتر اصلی انتخاب می‌شود؛ به این معنی که توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خط 1 می‌توانند بطور مستقل کنترل شوند. اینورتر خط 2 به عنوان پشتیبان اینورتر 1 است و توان اکتیو آن قابل کنترل نبوده

### 3. امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس در

#### حضور IPFC

کنترل توان عبوری از خط انتقال توسط IPFC را فرض کنیم در شکل 1-ب رله دیستانسی در شین فرستنده خط اول (1s) نصب شده باشد (شکل 3) و خطایی در فاصله اول  $L' = n \times L$  ( $n \leq 1$ ) از شین 1، در نقطه  $f$  رخ دهد. طول کل خط 1 است. با توجه به اینکه حفاظت خطوط انتقال در برابر انواع 10 گانه اتصال کوتاهها توسط 3 واحد رله دیستانس برای تشخیص اتصال کوتاههای فاز به زمین و 3 واحد رله دیستانس برای تشخیص اتصال کوتاههای فاز به فاز انجام می‌شود، لذا عملکرد رله دیستانس در هر یک از این اتصال کوتاهها در ادامه بررسی می‌شود.

**الف) اتصال کوتاههای فاز به زمین:** امیدانس دیده شده با فرض اینکه ولتاژ تزریقی IPFC به خط، سه فاز متعادل باشد ( $V_{pq} = V_{1pq}$ )، مدار معادل توالی مثبت و منفی و صفر برای اتصال کوتاه فاز  $a$  به زمین بصورت شکل 4 بوده و داریم:

$$V_{af} = V_{0f} + V_{1f} + V_{2f} \quad (3)$$

$$V_{af} = 0 \Rightarrow$$

$$(V_{0relay} + V_{1relay} + V_{2relay}) - V_{1pq} - Z_{1f}(I_1 + I_2) - Z_{0f}I_0 = 0$$

$$\Rightarrow V_{relay} - V_{pq} - Z_{1f}I_a - (Z_{0f} - Z_{1f})I_0 = 0$$

$$\Rightarrow V_{relay} - V_{pq} - Z_{1f}\left(I_a - \left(\frac{Z_{0f} - Z_{1f}}{Z_{1f}}\right)I_0\right) = 0 \quad (4)$$

با تعریف  $I_{relay} \triangleq I_a - \left(\frac{Z_{0f} - Z_{1f}}{Z_{1f}}\right)I_0$  داریم:

$$\frac{V_{relay}}{I_{relay}} = Z_{1f} + \frac{V_{pq}}{I_{relay}} \quad (5)$$

با توجه به اینکه خطا در فاصله  $L' = n \times L$  ( $n \leq 1$ ) از رله خط 1 رخ داده است، با فرض اینکه امیدانس واحد طول خط 1 برابر  $Z_1$  باشد:

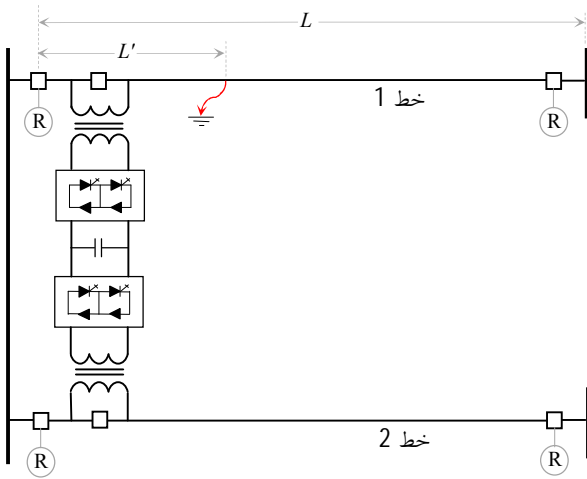
$$Z_{1f} = nZ_1 \quad (6)$$

با فرض:

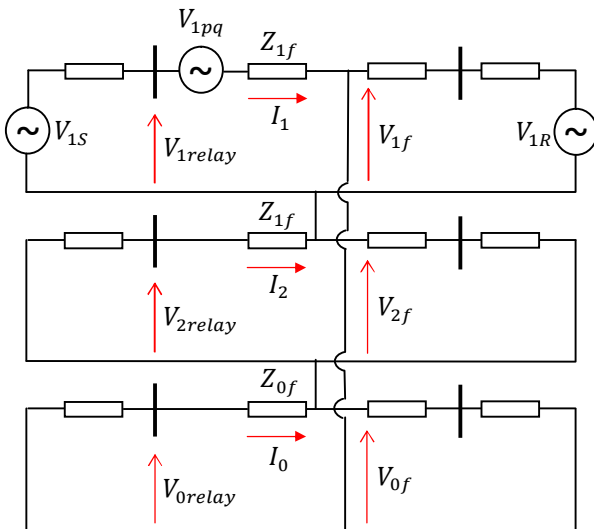
$$V_{pq} = Z_{pq}I_{relay} = (R_{pq} + jX_{pq})I_{relay} \quad (7)$$

امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس برابر است با:

$$Z_{seen} = \frac{V_{relay}}{I_{relay}} = nZ_1 + (R_{pq} + jX_{pq}) \quad (8)$$



شکل 3. اتصال کوتاه در یک سیستم انتقال دو خطه مجهز به IPFC



شکل 4. مدار معادل توالی مثبت و منفی و صفر برای خطای a-g

**ب) اتصال کوتاههای فاز به فاز:** برای اتصال کوتاه فاز  $a$  به

فاز  $b$  داریم:

$$V_{af} = V_{bf} \quad (9)$$

$$V_{bf} = V_{0f} + \alpha^2 V_{1f} + \alpha V_{2f} \quad (10)$$

در رابطه (10) و روابط بعدی  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$  می‌باشد. از (9) و (10) نتیجه می‌شود:

$$(\alpha^2 - 1)V_{1f} = (1 - \alpha)V_{2f} \quad (11)$$

دیستانس باعث عدم پوشش کامل حفاظتی خط و از دست رفتن قابلیت اعتماد<sup>1</sup> و افزایش برد آن باعث از دست رفتن معیار Selectivity (قطع کوچکترین قسمت ممکن از شبکه در صورت وقوع اتصال کوتاه) و ایمنی<sup>2</sup> سیستم حفاظتی می شود. اندازه و فاز  $Z_{pq}$  به مدهای عملکرد سلفی یا خازنی SSSC وابسته است و این مدهای عملکردی بسته به شرایط خط انتقال و سیستم کنترلی IPFC متغیر بوده و لازم است در طراحی سیستم حفاظتی خط انتقال مدنظر قرار گیرد. ضمن اینکه هر یک از ترانسفورماتورهای کوپلاژ SSSC با شبکه دارای بریکرهایی بمنظور خارج کردن IPFC در شرایط وقوع اتصال کوتاه هستند که با توجه به مکانیسم عملکرد آنها، تعیین امپدانس سری IPFC در مدت زمان حضور اتصال کوتاه، دارای عدم قطعیت است.

در یک نگاه کلی، می توان گفت حفاظت دیستانس خطوط انتقال مجهز به IPFC علاوه بر مشکلات متداولی که در حفاظت خطوط انتقال جبران شده با خازنهای سری وجود دارد (نظیر معکوس شدن ولتاژ و جریان، بسته به محل وقوع اتصال کوتاه، و کاهش برد رله به ازای اتصال کوتاه های نزدیک و افزایش برد آن به ازای اتصال کوتاه های دور دست)، دارای مشکلات زیر نیز می باشد:

(1) به ازای برخی از اتصال کوتاه ها ممکن است سیستم از مدار خارج کردن IPFC عمل نکرده و بسته به تنظیمات سیستم کنترلی آن باعث عملکرد IPFC در مد سلفی به منظور محدود کردن جریان اتصال کوتاه شود.

(2) در سیستم های انتقال چندخطه مجهز به IPFC، کاهش یا افزایش برد رله دیستانس هر یک از خطوط تابعی از درجه جبران سازی در خطوط دیگر بوده و این موضوع، استفاده از روش های تطبیقی در تنظیم زونهای حفاظتی رله دیستانس هر یک از خطوط را پیچیده تر می کند.

با توجه به مشکلات حفاظت امپدانس در خطوط جبران شده سری، روش های دیگر حفاظتی مانند حفاظت دیفرانسیل و حفاظت مبتنی بر امواج سیار برای این خطوط توصیه می شود.

$$V_{1f} = \alpha V_{2f} \quad (12)$$

بنابراین:

$$V_1 - V_{1pq} - Z_{1f} I_1 = \alpha (V_2 - Z_{1f} I_2) \quad (13)$$

$$Z_{1f} = \frac{V_1 - V_{1pq} - \alpha V_2}{I_1 - \alpha I_2} \quad (14)$$

از طرف دیگر، با فرض متعادل بودن ولتاژ تزریقی IPFC به خط داریم:

$$V_{pq} = V_{1pq} \quad (15)$$

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (16)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (17)$$

$$V_b = V_0 + \alpha^2 V_1 + \alpha V_2 \quad (18)$$

$$I_b = I_0 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 \quad (19)$$

از روابط (16) و (18) نتیجه می شود:

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= (1 - \alpha^2)V_1 + (1 - \alpha)V_2 \\ &= (1 - \alpha^2) \left( V_1 + \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha^2} V_2 \right) \\ &= (1 - \alpha^2)(V_1 - \alpha V_2) \end{aligned} \quad (20)$$

به همین ترتیب:

$$I_a - I_b = (1 - \alpha^2)(I_1 - \alpha I_2) \quad (21)$$

از (14)، (20) و (21) نتیجه می شود:

$$Z_{1f} = \frac{(1 - \alpha^2)(V_1 - \alpha V_2) - V_{pq}}{(1 - \alpha^2)(I_1 - \alpha I_2)} = \frac{(V_a - V_b) - V_{pq}}{(I_a - I_b)} \quad (22)$$

$$V_{relay} \triangleq V_a - V_b \quad (23)$$

$$I_{relay} \triangleq I_a - I_b \quad (24)$$

$$\frac{V_{relay}}{I_{relay}} = Z_{1f} + \frac{V_{pq}}{I_{relay}} \quad (25)$$

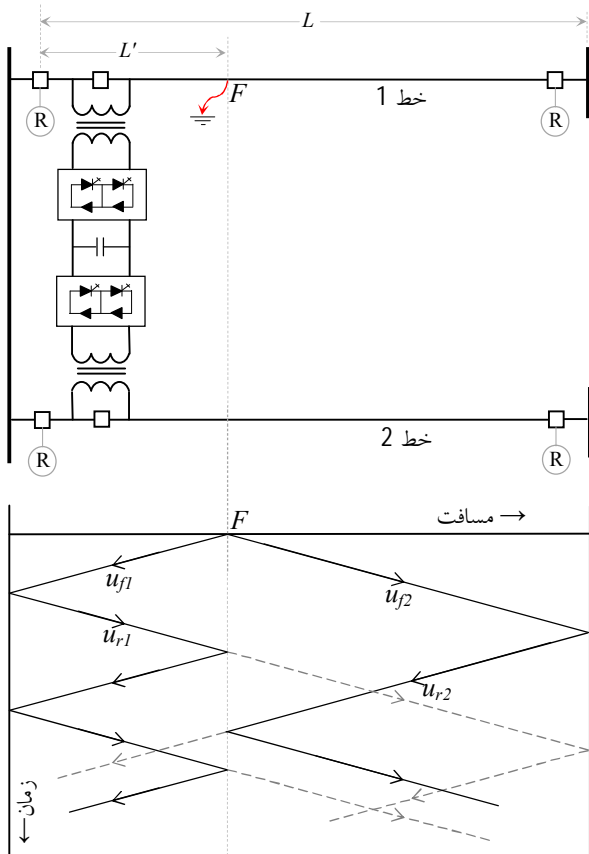
رابطه (25) مشابه رابطه (5) بوده و از آن می توان رابطه (8)

را نتیجه گرفت.

در نتیجه امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس در اثر وجود IPFC به میزان  $Z_{pq} = R_{pq} + jX_{pq}$  تغییر می کند که با توجه به اندازه و فاز  $Z_{pq}$  ممکن است باعث افزایش برد یا کاهش برد رله دیستانس شود. کاهش برد رله

1. Dependability

2. Security



شکل 5. امواج سیار رفت و برگشت ولتاژ ناشی از وقوع اتصال کوتاه

تشخیص و اندازه‌گیری امواج سیار در عمل با محدودیت‌هایی روبروست. یکی از محدودیت‌ها نیاز به فرکانس نمونه‌برداری بالاست. هر قدر فرکانس نمونه‌برداری بالاتر باشد، دقت اندازه‌گیری به همان نسبت بالاتر است. به طوری که در برخی از مراجع [16] به فرکانسهایی در حد 1 مگاهرتز اشاره شده است که با فرکانس نمونه‌برداری در رله‌های دیجیتال امروزی که در حدود 10 kHz است، ناسازگار است. اما پیش‌بینی می‌شود که این مشکل با پیشرفت تکنولوژی در آینده نزدیک مرتفع گردد [16]، [17]. مشکل دیگر محدودیت پهنای باند ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان است که این مشکل نیز با استفاده از مبدل‌های جدید اپتیکی و حسگرهای روگوفسکی قابل حل است [16]-[19]. همچنین، حساسیت تشخیص امواج سیار در حضور نویز نیازمند فیلترهای مناسب برای حذف نویز است [16]، [17]. بعلاوه، داده‌های شبکه باید قبل از ورود به رله برای جبران اثر ناهمواریهای احتمالی از فیلترهای ضدتشابه (Anti-Aliasing) عبور داده شوند.

با توجه به اینکه حفاظت مبتنی بر امواج سیار، بر خلاف حفاظت دیفرانسیل که از اطلاعات دریافتی از هر دو شینه ابتدا و انتهای خط استفاده می‌کند، نیازی به ارتباط مخابراتی با شینه مقابل نداشته و دارای سرعت بالایی در تشخیص اتصال کوتاه است، لذا در ادامه، استفاده از آن برای خطوط مجهز به IPFC پیشنهاد شده و کارایی آن با شبیه‌سازی نشان داده شده است.

#### 4. الگوریتم تشخیص اتصال کوتاه با استفاده از امواج سیار

بروز هر گونه تغییر ناگهانی در وضعیت کاری یا ساختاری سیستم قدرت مانند کلیدزنی خطوط و تجهیزات، وقوع اتصال کوتاه در قسمتی از خط انتقال و اصابت صاعقه به خط، ایجاد اضافه ولتاژ و اضافه جریانهای گذرا در خطوط می‌شوند. این امواج گذرا با سرعتی نزدیک سرعت نور در طول خط حرکت کرده و در اثر برخورد به خطی با امپدانس مشخصه متفاوت مقداری از آنها وارد خط جدید شده و مقداری نیز منعکس شده و به خط اول بر می‌گردد (شکل 5). به این امواج به ترتیب امواج سیار رفت و برگشت گفته می‌شود. اگر ولتاژهای رفت ( $u_r$ ) و برگشت ( $u_f$ ) را بر حسب ولتاژ ( $u$ ) و جریان خط ( $i$ ) بنویسیم، داریم:

$$\begin{cases} u_f = \frac{1}{2} (\Delta u + Z_0 \Delta i) \\ u_r = \frac{1}{2} (\Delta u - Z_0 \Delta i) \end{cases} \quad (26)$$

که در آن:

$$\begin{cases} \Delta u = u^{PRE-FAULT} - u^{POST-FAULT} \\ \Delta i = i^{PRE-FAULT} - i^{POST-FAULT} \end{cases} \quad (27)$$

و  $u^{PRE-FAULT}$  و  $i^{PRE-FAULT}$  مقادیر ولتاژ و جریان حالت ماندگار خط انتقال هستند که می‌توانند مقادیر ثبت شده در یک سیکل قبل از لحظه وقوع اتصال کوتاه باشند [15].

الگوریتم تشخیص اتصال کوتاه با استفاده از امواج سیار که در شکل 6 آورده شده است، شامل مراحل زیر است:

1) جمع آوری داده‌ها: برای تشخیص خطا توسط امواج سیار لازم است مقادیر ولتاژ و جریان هر سه فاز توسط واحدهای اندازه‌گیری رله‌های دیجیتال، با فرکانس بالا نمونه‌برداری شود.

مستقل از هم تفکیک کرد. یک نمونه از تبدیلهای مدال به فرم

$$\begin{aligned} v_{0,\alpha,\beta} &= T^{-1}v_{a,b,c} \\ i_{0,\alpha,\beta} &= T^{-1}i_{a,b,c} \end{aligned} \quad (28)$$

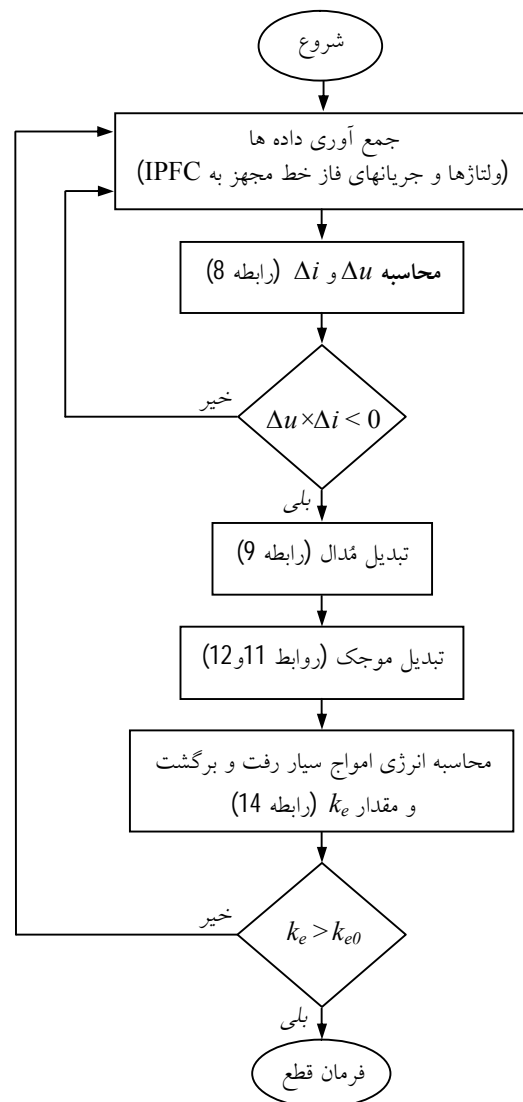
که در آن T ماتریس تبدیل کلارک بوده و برابر است با:

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (29)$$

بدین ترتیب فازهای  $a$  و  $b$  و  $c$  به سه مُد  $0$  و  $\alpha$  و  $\beta$  تفکیک می شوند. مشخصه‌های امواج سیار به پارامترهای خط انتقال (شامل راکتانس سری و سوسپتانس موازی) وابسته است. از آنجا که تحلیل حالت گذرا و امواج سیار در گستره وسیعی از فرکانسها صورت گرفته و پارامترهای خط انتقال در سطوح بالا، متوسط و پائین این گستره فرکانسی مقادیر متفاوتی دارند، در نتیجه امواج سیار در هر یک از این سطوح فرکانس دارای مشخصه‌ها و سرعت انتشار متفاوتی هستند. این پدیده که به پراکندگی فرکانس<sup>1</sup> است، باعث ایجاد اعوجاجهای نامطلوب در شکل موج ولتاژ و جریان خط انتقال می گردد. بر اساس مطالعات انجام شده، مد  $0$  دارای پراکندگی فرکانس بیشتری نسبت به مدهای  $\alpha$  و  $\beta$  بوده و برای تحلیل امواج سیار مناسب نیست [21]. با توجه به تشابه تقریبی مدهای  $\alpha$  و  $\beta$  برای تحلیل حالت گذرا در این مقاله از مد  $\alpha$  استفاده می شود. (4) تبدیل موجک: بطور کلی هر سیگنال از مجموعه ای از اطلاعات فرکانس پائین و فرکانس بالا تشکیل شده است. رفتار آن است، در حالیکه اطلاعات فرکانس بالا مشخص کننده تغییرات جزئی سیگنال است. بدیهی است هر سیگنال از روی اطلاعات فرکانس پائین آن قابل شناسایی است، ولی اطلاعات فرکانس بالا چنین نیست. لذا به اطلاعات فرکانس پائین، تقریبات<sup>2</sup> و به اطلاعات فرکانس بالا، جزئیات<sup>3</sup> گفته می شود. در تبدیل موجک گسسته، ابتدا مؤلفه های فرکانس بالا و

(2) محاسبه  $\Delta u$  و  $\Delta i$  با توجه به رابطه (8) و تعیین علامت حاصلضرب  $\Delta u \times \Delta i$ . منفی بودن این حاصلضرب نشان دهنده این است که خطا در جلوی رله اتفاق افتاده و مثبت بودن بودن آن نشان دهنده این است که خطا در پشت رله اتفاق افتاده است و رله نباید در این مورد عمل کند [20].

(3) تبدیل مُدال: وجود اندوکتانس متقابل بین فازها در سیستم‌های انتقال سه فاز واقعی باعث تأثیر متقابل جریان‌های ناشی از اتصال کوتاه و سایر پدیده‌های گذرا در امواج سیار عبوری از فازهای دیگر می شود و تحلیل همزمان سیستم را دشوار می سازد. برای حل این مشکل، با استفاده از تبدیلهای مُدال می توان سیستم سه فاز کوپله شده را به سه سیستم مجزا و



شکل 6. فرآیند تشخیص خطا با استفاده از امواج سیار

1. Frequency Dispersion
2. Approximations
3. Details

موجک اصلی (موجک مادر) وابسته است. برخی از موجکهای مادر متداول عبارتند از: Haar، Daubechies و Symlets. علاوه بر این موجکها، امکان تعریف موجکهای جدید نیز وجود دارد. برای تشخیص اغتشاشات گذرا، شکل موج موجک اصلی باید با شکل موج اغتشاش ایجاد شده شباهت داشته باشد تا اطلاعات فرکانس بالا از تبدیل موجک استخراج شود. به علاوه برای استفاده از قضیه پارسوال در محاسبه انرژی، موجک اصلی باید متعامد باشد. در این مقاله موجک Daubechies (db) که به سادگی قابل پیاده سازی است، انتخاب می شود. بر اساس بررسیهای انجام شده [15]، سطح اول تبدیل موجک با استفاده از db8 (db8-Level1) برای تشخیص و آشکارسازی انواع خطاها مناسب است، اما برای در نظر گرفتن حالت های گذرای با فرکانس بالاتر (در حدود 100 kHz)، بهتر است سطح تفکیک سیگنال را تا 5 سطح افزایش داد.

5) معیار تشخیص خطا: معیار تشخیص خطا بصورت زیر تعریف می شود:

$$k_e = \frac{E_f}{E_b} \quad (33)$$

که در آن  $E_f$  و  $E_b$  به ترتیب انرژی مؤلفه  $CD_5$  امواج سیار رفت و برگشت ولتاژ هستند که پس از وقوع اتصال کوتاه بوجود می آیند. به علت انعکاس صورت گرفته از انتهای خط،  $E_f$  از  $E_b$  بزرگتر بوده و لذا  $k_e$  بزرگتر از 1 است. بنابراین برای تشخیص اتصال کوتاه (از هر نوع) می توان گفت: « اگر  $k_e$  از یک مقدار آستانه از قبل تعیین شده مثل  $k_{e0}$  بزرگتر باشد، اتصال کوتاه رخ داده است.» مقدار آستانه  $k_{e0}$  با توجه به ضرایب انعکاس شینه های مجاور و انرژی سیگنال های گذرای ناشی از کلیدزنی تعیین می شود. برای جلوگیری از حالت تعریف نشده تقسیم عدد بر صفر، اگر مقدار  $k_e$  از  $10^{-5}$  کوچکتر باشد، مقدار آن صفر در نظر گرفته می شود.

## 5. نتایج شبیه سازی

سیستم انتقال دو خطه شکل 3 در نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده و نتایج آن در این بخش نشان داده می شود. اطلاعات سیستم در جدول 1 آمده

فرکانس پائین سیگنال توسط فیلترهای بالاگذر و پائین گذر از هم تفکیک می شوند. از آنجا که در پردازش دیجیتال سیگنال از سیگنال های واقعی با فرکانس معینی نمونه برداری می شود، فرآیند فیلتراسیون مذکور باعث دو برابر شدن تعداد خروجی ها خواهد شد. برای حل این مشکل از هر دو نمونه خروجی، یکی نگهداشته شده و دیگری حذف می شود. بدین ترتیب اطلاعات فرکانس پائین و فرکانس بالای سیگنال به ترتیب توسط ضرایب  $cA$  و  $cD$  (که به آنها ضرایب تبدیل موجک گسسته می گویند) بدست می آید. این فرآیند می تواند تا سطح<sup>1</sup> معینی (که به دقت مورد نیاز بستگی دارد) ادامه یابد و به آن روش MRA<sup>2</sup> می گویند (شکل 7).

بدین ترتیب ضرایب  $cA$  و  $cD$  در سطح  $j$  ام از روابط زیر بدست می آیند [15]:

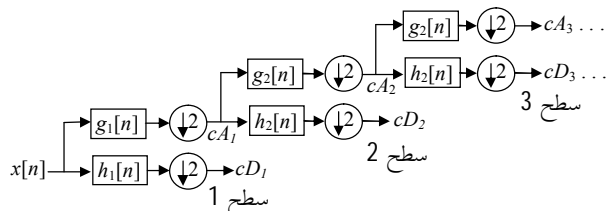
$$cA_j[n] = \sum_k h[k-2n]cA_{j-1}[k] \quad (30)$$

$$cD_j(n) = \sum_k g[k-2n]cD_{j-1}[k] \quad (31)$$

که در آن  $h[n]$  و  $g[n]$  به ترتیب فیلترهای پائین گذر و بالاگذر هستند. برای اندازه گیری مؤلفه های فرکانس بالا میتوان از طیف انرژی موجک استفاده کرد. بر اساس قضیه پارسوال، در صورتیکه توابع  $cA$  و  $cD$  متعامد باشند، انرژی سیگنال برابر است با:

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |cA_j[n]|^2 + \sum_{j=0}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} |cD_j[k]|^2 \quad (32)$$

در تبدیل موجک، سیگنال اصلی به صورت ترکیبی از موجک های مادر تغییر مقیاس یافته و شیفت داده شده در می آید. کارایی تبدیل موجک تا حد زیادی به نحوه انتخاب

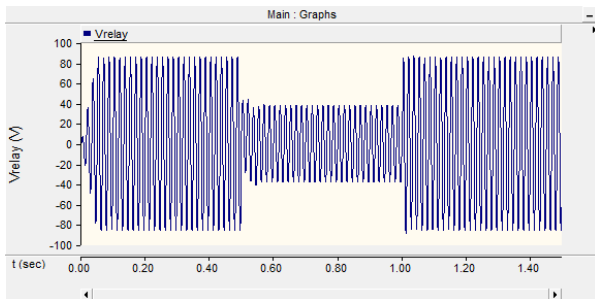


شکل 7. فرآیند MRA

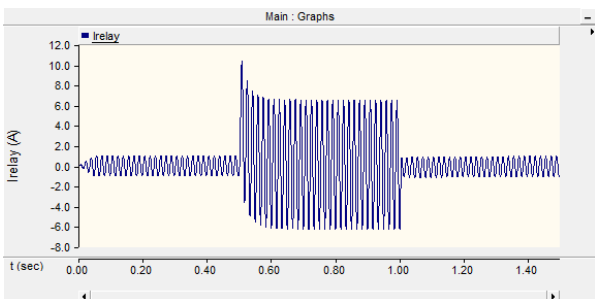
1. Scale
2. Multi-Resolution Analysis



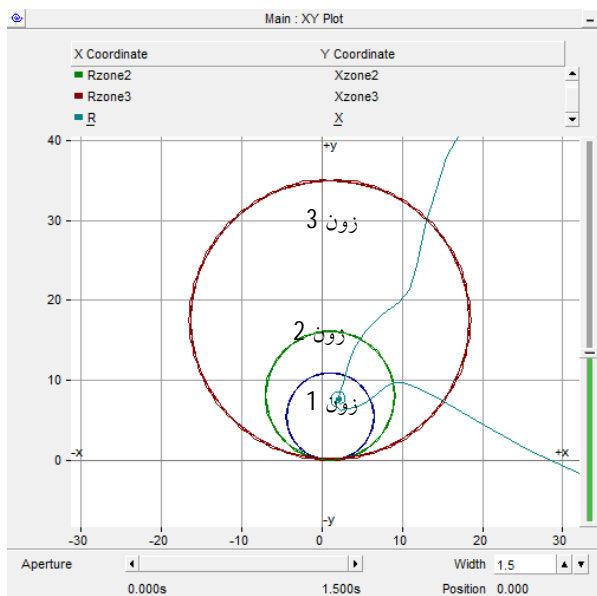
شده است. همانطور که دیده می‌شود، رله اتصال کوتاه را در زون 3 و با تأخیر می‌بیند که در نتیجه دارای کاهش برد شده است. شکل 10 تبدیل موجک ولتاژ فاز a را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 8. (الف) شکل موج ولتاژ فاز a، (ب) شکل موج جریان فاز a و (ج) مکان هندسی امپدانس برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین در خط اول بدون حضور IPFC

است. طول خط اصلی بین شینهای فرستنده و گیرنده و خط بعد از شین گیرنده 100 کیلومتر در نظر گرفته شده است. تنظیمات زون‌های حفاظتی رله دیستانس ابتدای خط 1 در زیر آمده است.

جدول 1. اطلاعات سیستم شبیه سازی شده

ولتاژ شین فرستنده = 230 [kV]  
 $VTR = 230 [kV]:115 [V]$  = نسبت تبدیل ترانسفورماتور ولتاژ  
 $CTR = 1000:1$  = نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان  
 $1.78 + j25.39 [\Omega]$  = امپدانس سری توالی مثبت خطوط  
 $100 [MW] + j25 [MVar]$  = بار متصل به شینهای گیرنده  
 قدرت نامی IPFC = 100 [MVA]  
 فرکانس نمونه برداری = 20 [kHz]

$$Zone1 = 0.85 (1.78 + j25.39) = 21.63 \angle 86^\circ [\Omega]$$

$$Zone2 = 1.5 \times Zone1 = 32.45 \angle 86^\circ [\Omega]$$

$$Zone3 = Zone1 + 1.5 \times Zone2 = 70.31 \angle 86^\circ [\Omega]$$

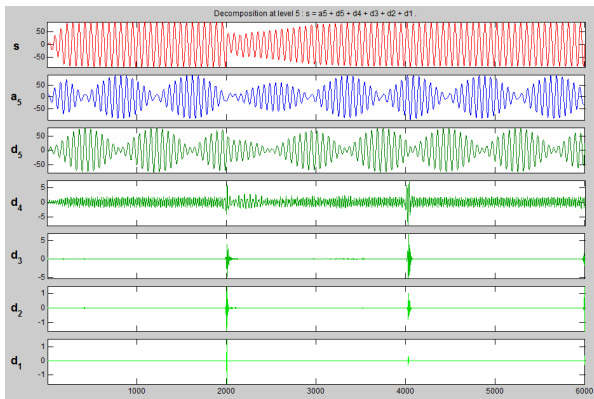
برای محاسبه مقادیر معادل در سمت ثانویه ترانسفورماتورهای اندازه گیری، اعداد بدست آمده را در نسبت  $CTR/VTR$  ضرب می کنیم:

$$Zone1 = 10.81 \angle 86^\circ [\Omega]$$

$$Zone2 = 16.22 \angle 86^\circ [\Omega]$$

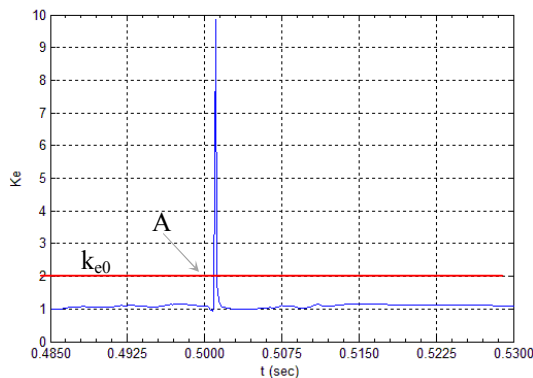
$$Zone3 = 35.15 \angle 86^\circ [\Omega]$$

در حالتی که IPFC وجود ندارد، مکان هندسی امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس ابتدای خط 1 و شکل موج ولتاژ در محل رله برای اتصال کوتاه فاز a به زمین در وسط خط 1 (به فاصله نصف طول خط از شین فرستنده) در شکل 8 نشان داده شده است. در این حالت و حالت بعدی، مدت زمان اتصال کوتاه از لحظه  $t = 0.5 \text{ sec}$  تا  $t = 1 \text{ sec}$  در نظر گرفته شده است. همانطور که شکل 8 دیده می‌شود، رله اتصال کوتاه را در زون 1 خود می‌بیند. در حالت وجود IPFC مکان هندسی امپدانس دیده شده توسط رله در شکل 9 نشان داده



شکل 10. تبدیل موجک db8 پنج سطحه ولتاژ فاز a

در شرایط عادی و عدم وقوع خطا، مقدار شاخص  $k_e$  تقریباً برابر 1 است، مقدار آستانه  $k_{e0}$  برابر 2 در نظر گرفته شده است. همانطور که در بخش هم اشاره شد، تعیین دقیق  $k_{e0}$  به آرایش شبکه و انرژی امواج گذرای ناشی از کلیدزنی بستگی دارد. همانطور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، در اثر وقوع اتصال کوتاه، در لحظه  $t = 0.5015 \text{ sec}$  مقدار  $k_e$  از مقدار آستانه  $k_{e0}$  بیشتر شده است که در نتیجه رله  $1.5 \text{ msec}$  بعد از وقوع خطا، آنرا تشخیص می‌دهد.

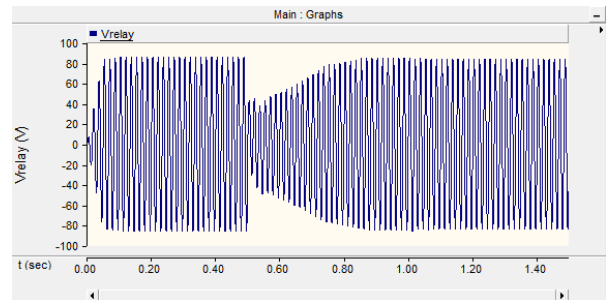


شکل 11. تغییرات شاخص  $k_e$  هنگام وقوع اتصال کوتاه؛ در نقطه A رله خطا را تشخیص داده و به بریکر فرمان قطع می‌دهد.

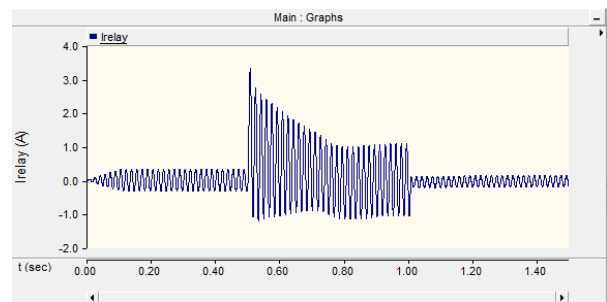
## 6. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

- مقایسه شکل‌های 8-الف و 9-الف، تأثیر IPFC را در بازیابی ولتاژ خط در حین اتصال کوتاه نشان می‌دهد.  
- همانطور که گفته شد، این الگوریتم در  $1.5 \text{ msec}$  پس از وقوع اتصال کوتاه قادر به شناسایی آن است که با مقادیر معمول الگوریتم‌های حفاظتی مافوق سریع سازگار است.

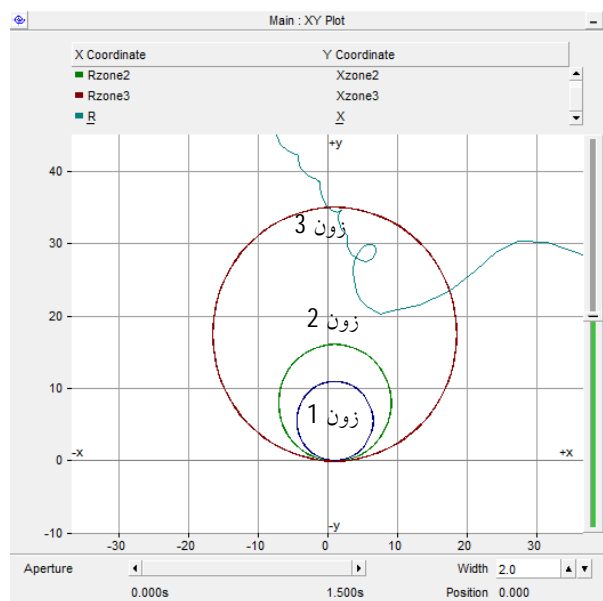
برای استفاده از تئوری امواج سیار، شکل موج سه فاز ولتاژ و جریان در محل رله (ابتدای خط 1) توسط نرم افزار PSCAD محاسبه شده و سپس به کمک نرم افزار MATLAB تغییرات شاخص  $k_e$  در زمانهای نزدیک لحظه وقوع خطا در شکل 11 نشان داده شده است. با توجه به اینکه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 9. (الف) شکل موج ولتاژ فاز a، (ب) شکل موج جریان فاز a و (ج) مکان هندسی امپدانس دیده شده توسط رله در حضور IPFC

Characteristic," *IEEE/PES Trans. & Dist. Conf.*, pp. 1-6, 2005.

- [6] T. S. Sidhu, R. K. Varma, P. K. Gangadharan, F. A. Albasri, and G. R. Ortiz, "Performance of Distance Relays on Shunt—FACTS Compensated Transmission Lines," *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 1837-1844, Jul. 2005.
- [7] S. Jamali, A. Kazemi, and H. Shateri, "Modified Distance Protection due to Presence of STATCOM on a Transmission Line," *IEEE Power Tech Conf., Romania*, 2009.
- [8] L. Qing, W. Zeng-ping and Z. Yuan, "Study on a novel method of distance protection in transmission line with STATCOM," *Power and Energy Eng. Conf.*, pp. 1-5, 2010.
- [9] A. Kazemi, S. Jamali and H. Shateri, "Distance Relay Over-Reaching due to TCSC Presence on Second Circuit of Double Circuit Line," *Int. Conf. on Power Eng., Energy and Electrical Drives*, pp. 481-486, 2007.
- [10] S. A. Shahriari, M. H. Abardeh, A. Y. Varjani and M. Mohamadian, "Using Fault Current Limiter to Minimize Effect of Thyristor Controlled Series Capacitor on Over Reach Problem of Distance Protection," *IEEE/PES Power Sys. Conf. and Exp.*, 2009.
- [11] A. Kazemi, S. Jamali and H. Shateri, "Effects of SSSC on Distance Relay Tripping Characteristic," pp. 1-6, 2007.
- [12] M. Khederzadeh, A. Ghorbani and A. Salemnia, "Impact of SSSC on the Digital Distance Relaying," *IEEE/PES Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2009.
- [13] M. Pouyan, F. Razavi and M. Rashidi-Nejad, "Performance of Distance Relays in Presence of IPFC," *IEEE Power Tech Conf., Romania*, pp. 1-6, 2009.
- [14] L. Gyugyi, K. K. Sen and C. D. Schauder, "The Interline Power Flow Controller Concept: A New Approach to Power Flow Management in Transmission Systems," *IEEE Trans. Power. Del.*, Vol. 14, No. 3, Jul. 1999.
- [15] C. Pang, and M. Kezunovic, "Fast Distance Relay Scheme for Detecting Symmetrical Fault During Power Swing," *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2205-2212, Oct. 2010.
- [16] E. Vázquez, J. Castruita, O. L. Chacón and A. Conde, "A New Approach Traveling-Wave Distance Protection—Part I: Algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 765–800, Apr. 2007.
- [17] P. Jafarian and M. Sanaye-Pasand, "A Traveling-Wave-Based Protection Technique Using Wavelet/PCA Analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 588–599, Apr. 2010.
- [18] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand and P. Jafarian, "Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, pp. 656–666, 2011.

- در حین اتصال کوتاه، مقدار شاخص مورد استفاده برای حفاظت تفاوت قابل ملاحظه‌ای با حالت عادی دارد. در نتیجه به سادگی می‌توان این دو حالت را از یکدیگر تفکیک نمود.

- عدم استفاده از امیدانس مسیر اتصال کوتاه در این روش حفاظتی، امکان بکارگیری آنرا در مواردی که روشهای حفاظتی امیدانسی با مشکل مواجهند، مانند حفاظت خطوط انتقال در شرایط نوسان توان، خطوط کوتاه، خطوط دو مداره و همچنین حفاظت خط در حضور انواع دیگر کنترل‌کننده‌های FACTS فراهم می‌سازد.

## 7. نتیجه‌گیری

در این مقاله کارایی روش حفاظت در حضور IPFC با استفاده از امواج سیار در خطوط انتقال نشان داده شد. همانطور که اشاره شد، وجود IPFC و به طور کلی کنترل‌کننده‌های FACTS موجب تغییر در امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس و احتمال اشتباه در تشخیص اتصال کوتاه می‌شود. از آنجا که در روش ارائه شده اساساً از امیدانس مسیر اتصال کوتاه استفاده نمی‌شود، لذا می‌توان ادعا کرد که حفاظت خطوط انتقال با استفاده از امواج سیار یک راه‌حل جامع برای حفاظت سیستم انتقال در حضور انواع مختلف ادوات FACTS است.

## 8. مراجع

- [1] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, "Power System Relaying", 3rd ed., UK: Wiley, 2008.
- [2] F. A. Albasri, T. S. Sidhu and R. K. Varma, "Performance Comparison of Distance Protection Schemes for Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines," *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 2116-2125, Oct. 2007.
- [3] E. Abedi, H. A. Abyaneh, R. Asgari, s. Sadeghi and M. Shafiee, "Analysis of the SVC Impact on Distance Relays Performance," *31st Int. Telecom. Energy Conf.*, pp. 1-5, 2009.
- [4] E. Zhang, S. Lee, M. Choi and S. Oda, "Considerations on Distance Relay Setting for Transmission Line with STATCOM," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2010.
- [5] A. Kazemi, S. Jamali and H. Shateri, "Effects of STATCOM on Distance Relay Tripping

- [19] C. Xianghui, Z. Xiangjun, M. Hongjiang, L. Zewen, L. Ling and D. Feng, "Rogowski Sensor for Power Grid Traveling Wave Based Fault Location," *IET 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection*, pp. 438–443, Glasgow, UK, Mar. 2008.
- [20] W. Chen, O. P. Malik, X. Yin, D. Chen, and Z. Zhang, "Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1134–1139, Oct. 2003.
- [21] Z. Gui-bin and G. Hou-lei, "Algorithm for Ultra High Speed Travelling Wave Protection with Accurate Fault Location," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2008.