



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران  
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتي اميركبير  
قطب علمي قدرت

## کاهش دقت عملکرد رله دیستانس در حفاظت خطوط انتقال با حضور CVT و TCSC

میثم محمدی

احسان نصر آزادانی

یاسر دامچی

دانشگاه زنجان - دانشکده برق

تلفن: ۰۲۴۱-۵۱۵۲۴۹۵

[h\\_kazemi\\_ir@yahoo.com](mailto:h_kazemi_ir@yahoo.com)

چکیده - در این مقاله اثرات خطای سنجش رله دیستانس در حفاظت شبکه های قدرت با در نظر گرفتن مدل دقیق ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT) و خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) مورد ارزیابی و تحلیل قرار میگیرد و نشان داده می شود که حداکثر خطا برای چه نوع خطا و رد چه حالتی روی میدهد. در این بررسی انواع خطاهای مختلف با مقادیر متفاوت مقاومت خطا بحث و بررسی شده است و برای هر یک از بدترین شرایط نحوه تغییرات گذرای امپدانس نیز در اثر استفاده از CVT نشان داده شده است. در اینتحقیق از مدل و پارامترهای عملی شبکه، CVT و خازنهای سری استفاده شده و برای تخمین مقدار امپدانس از روش فوریه تمام سیکل (FFT) استفاده شده است. کلیه شبیه سازی ها در محیط PSCAD/EMTDC صورت گرفته است.

کلید واژه- ترانسفورماتور خازنی، خازن سری کنترل شده با تریستور، رله دیستانس.

### ۱- مقدمه

های انجام شده از مدل ارائه شده در مرجع [۶] که هم از سادگی لازم و هم شرایط مورد نیاز را فراهم میکند در این مقاله استفاده شده و مقادیر پارامترهای آن بر اساس نمونه یک CVT واقعی تعیین گردیده است. سپس اثر بروز خطا بر روی عملکرد رله دیستانس در حالات مختلف بررسی شده و بیشترین درصد خطا تعیین گردیده است. در این مقاله در ابتدا به مدل مناسب CVT پرداخته می شود و سپس مقادیر و پارامترهای شبکه مورد آزمایش معرفی شده و در انتهای حالات مختلف، خطای سه فاز، دو فاز، دوفاز به زمین و تک- فاز به زمین با مقادیر مختلف مقاومتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

نتایج بدست آمده نشان میدهد که مقدار خطای امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس بستگی به شرایط بروز خطا و نوع آن دارد و میتواند تا ۴۷/۵ درصد عدم دقت ایجاد کند.

### ۲- مدار معادل CVT

مدار معادل و ساختار CVT استفاده شده در شکل (۱) نشان داده شده است. این مدار معادل شامل سه قسمت مقسم

در شبکه قدرت الکتریکی، هدف تولید و انتقال انرژی الکتریکی و تحویل به مصرف کننده است. لذا طراحی سیستم باید به گونه ای باشد که دارای دو ویژگی قابلیت اطمینان و اقتصادی بودن باشد. مهم ترین عامل تهدید کننده قابلیت اطمینان سیستم اتصال کوتاه است، که تغییرات ناگهانی روی سیستم اعمال می کند. این تغییرات ناگهانی باعث از بین رفتن پایداری سیستم می شود. حفاظت دیستانس شرایط لازم برای قابلیت اعتماد و سرعت لازم برای حفاظت سیستم را فراهم می کند. مدل ارائه شده برای CVT بر اساس بررسی های انجام شده از مدل ارائه شده در مرجع [۱] می باشد. مدل ارائه شده برای TCSC بر اساس مرجع [۲] می باشد.

در این زمینه مدلهای مختلفی ارائه شده است [۳-۶]. مدل استفاده شده در مرجع [۳] کامل و جامع نمی باشد زیرا مدار القاگر ولتاژ میانی به طور کامل بررسی نشده است. در مرجع [۴] مدل ارائه شده بسیار ساده می باشد و ترانسفورماتور ولتاژ میانی ایده آل در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده در مرجع [۵] بسیار پیچیده می باشد. لذا بر اساس بررسی-

## ۲-۳ ترانسفورماتور ولتاژ میانی

جهت اندازه گیری ولتاژ شبکه در یک CVT پس از کاهش ولتاژ توسط شبکه مقسم ولتاژ خازنی این ولتاژ پس از عبور از القاگر ولتاژ میانی باید توسط یک ترانسفورماتور کاهنده کاهش یابد تا به ولتاژی در حدود ۲۰۰ تا ۵۰ ولت برسد. [۱]

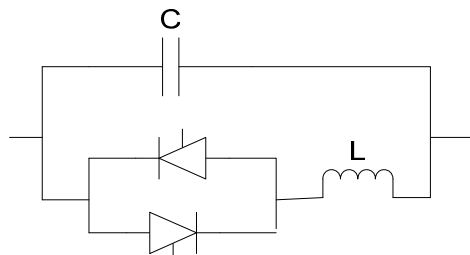
## ۳- مدار معادل TCSC

مدار معادل TCSC در شکل (۲) نشان داده شده است. این طرح شامل خازن سری است که با راکتور کنترل شده با تریستور موازی شده است [۷]. در اجرای عملی TCSC، چندین جبران ساز از این نوع می تواند به صورت سری به هم متصل شوند تا ولتاژ نامی و مشخصات عملکردی مطلوب بدست آید. امپدانس حالت ماندگار TCSC امپدانس یک مدار موازی LC است که شامل امپدانس خازنی ثابت  $X_C$  و امپدانس القایی متغیر  $X_L(\alpha)$  است [۸]. یعنی این که:

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha} \quad (3)$$

$$X_{TCSC} = \frac{X_C \cdot X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (4)$$

و  $\alpha$  زاویه تاخیر آتشی است که از نقطه پیک ولتاژ خازن (یا معادل آن، نقطه صفر شدن ولتاژ خط) اندازه گیری شده است [۴].



شکل ۲: مدار معادل TCSC

## ۴- شبکه مورد آزمایش

برای شبیه سازی ابتدا نواحی رله روی ۸۰، ۱۵۰ و ۲۲۵ کیلومتر خط طوری تنظیم شده است که امپدانس اندازه گیری شده توسط CVT و ولت متر در داخل ناحیه مورد نظر و نزدیک به مرز، در زون های اول تا سوم قرار گیرد. سپس مقدار خطای کاهش دید رله در حالت اندازه گیری توسط CVT به عنوان خطای عملکرد CVT (میزان کاهش دید رله) در هنگام اعمال انواع اتصال کوتاه در سیستم انتقال تعیین می گردد. در حالت اتصال کوتاه دوفاز به زمین و تک

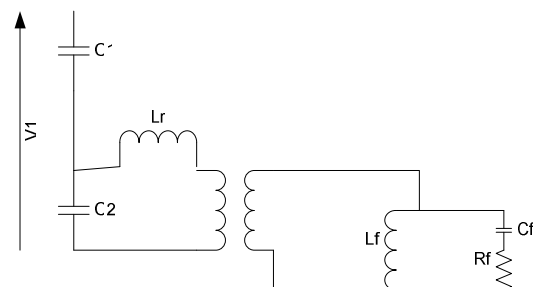
ولتاژ خازنی، القاگر ولتاژ میانی و ترانسفورماتور ولتاژ میانی است.

## ۲-۱ مقسم ولتاژ خازنی

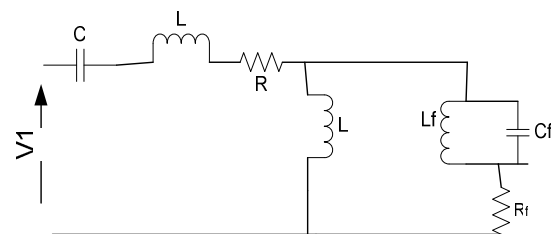
مدار مقسم شامل دو خازن است که با هم موازی هستند که با توجه به شکل (۱-ب) معادله تونن آن در ورودی به صورت (۱) می باشد.

$$V_1 = \frac{C}{C_1 + C_2} V_{in} \quad C = C_1 + C_2 \quad (1)$$

لازم به ذکر است که مقادیر خازن در حدود چند نانو فاراد است.



شکل (۱-الف): ساختار CVT



شکل (۱-ب) مدار معادل CVT

شکل ۱: مدار معادل و ساختار CVT

## ۲-۲ القاگر ولتاژ میانی

با توجه به مدار معادل تونن،  $C_1 + C_2$  سری با ترانسفورماتور ولتاژ میانی است، بنابراین ولتاژ خروجی به سر ترانسفورماتور ولتاژ میانی اعمال نمی شود. برای رفع این نقص از سلف سری استفاده شده است. مقدار صحیح القاگر از فرمول (۲) استفاده می شود.

$$L = \frac{1}{\omega^2 (C_1 + C_2)} \quad (2)$$



جدول (۲): مشخصات منبع خط انتقال

|                |                          |
|----------------|--------------------------|
| ۱۰۰            | MVA توان منبع            |
| ۲۳۰            | سطح ولتاژ (kV)           |
| ۵۰             | فرکانس (Hz)              |
| $1/31 + j15$   | امپدانس توالی مثبت (ohm) |
| $2/33 + j2/66$ | امپدانس توالی منفی (ohm) |

جدول (۳): مشخصات CVT

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| $3/5 \times 10^{-3}$    | $C_1 (\mu F)$  |
| $1/221 \times 10^{-1}$  | $C_2 (\mu F)$  |
| ۸۰/۷                    | $L (H)$        |
| $2/5 \times 10^{-3}$    | $R (\Omega)$   |
| $9/327 \times 10^{-9}$  | $C_f (F)$      |
| $1/0.86 \times 10^{-3}$ | $L_f (H)$      |
| $1/87 \times 10^{-5}$   | $R_f (\Omega)$ |

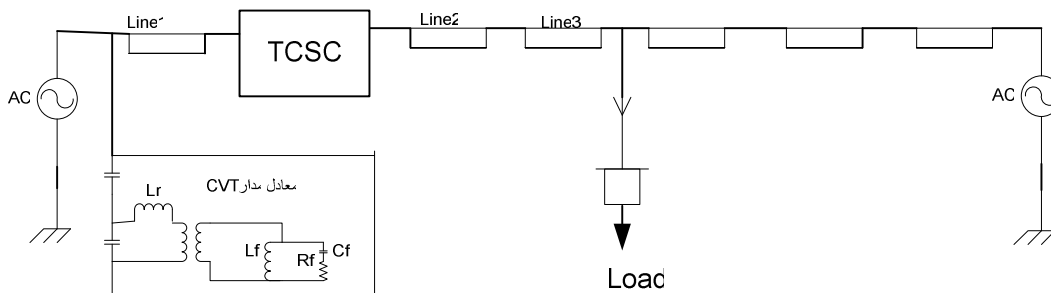
جدول (۴): پارامترهای فیزیکی زمین خط انتقال

|     |                      |
|-----|----------------------|
| ۲۰۰ | مقاومت زمین (ohm/Km) |
| ۱   | تراوایی نسبی زمین    |

فاز به زمین از مقاومت‌های متفاوت بین ۱۰ تا ۱۰۰ اهم استفاده شده است. در حالت اتصال کوتاه تک‌فاز و دو فاز به زمین سلفی نیز برای خطاهای نزدیک نیروگاههایی که نقطه صفر ژنراتور توسط سلف به زمین متصل شده‌اند، از مقادیر مختلف سلفی بین ۱۰ تا ۱۰۰ اهم استفاده گردیده است. در این شبیه سازی ولتاژ اعمالی به CVT برابر ۲۳۰ کیلو ولت و ولتاژ خروجی برابر ۱۱۰ ولت است که از روش FFT برای به دست آوردن امپدانس استفاده شده است. رله مهو استفاده شده در این مقاله رله مهو ۴۵ درجه است. جهت بررسی اثر CVT بر عملکرد رله دیستانس از شبکه با مشخصات مندرج در جدول (۱) تا (۴) استفاده شده است. در این شبیه سازی زاویه آتش TCSC برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است تا از نظر بهبود ولتاژ خط دارایی‌بیشترین اثر باشد.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خط انتقال

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| Chuker   | نوع هادی                      |
| خطی افقی | آرایش هادی                    |
| دوتایی   | تعداد باندل                   |
| ۲        | قطر هادی (cm)                 |
| ۰/۰۸۱    | مقاومت DC هادی (ohm/km)       |
| ۳۰       | فاصله هادی در هر باندل (cm)   |
| ۸        | فاصله فازها از یکدیگر (m)     |
| ۲۵       | فاصله هادی ها از سطح زمین (m) |
| ۸        | فاصله بین سیم های گارد (m)    |
| ۳۱       | فاصله سیم گارد تا زمین (m)    |
| ۵        | فاصله متوسط شکم خط (m)        |
| ۳۰۰      | طول خط                        |



شکل (۲): سیستم انتقال شبیه‌سازی شده



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران  
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت

شکل (۳) : منحنی تغییرات امپدانس با خطای دوفاز به زمین مقاومتی با اتصال کوتاه بی مقاومت در ناحیه اول

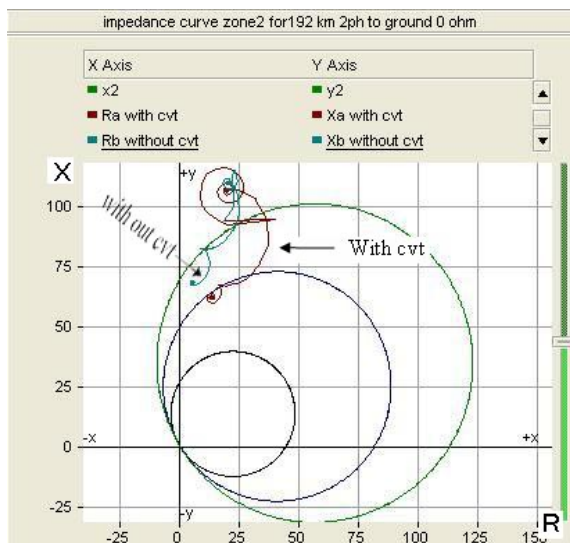
#### ۵-۲- اثر CVT و TCSC در عملکرد رله دیستانس در ناحیه دوم

در این حالت نتایج مندرج در جدول (۶) نیز نشان می‌دهد که خطای دو فاز به زمین بدون مقاومت دارای بیشترین درصد خطا به میزان ۲۸٪ می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۶): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه دوم به ازای انواع خطای مختلف

| اتصال کوتاه         | سه فاز | دو فاز | تک فاز | دو فاز به زمین |
|---------------------|--------|--------|--------|----------------|
| بی مقاومت           | ۴٫۶٪   | ۳٫۳٪   | ۶٫۶٪   | ۲۸٪            |
| ۱۰ Ω                | -      | ۳٫۳٪   | ۳٫۳٪   | ۱۰٪            |
| ۱۰۰ Ω (مقاومت بالا) | -      | ۴٪     | ۴٫۶٪   | ۳٫۳٪           |

منحنی تغییرات امپدانس در این حالت در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) : منحنی تغییرات امپدانس با خطای دوفاز به زمین مقاومتی با اتصال کوتاه بی مقاومت در ناحیه دوم

#### ۵-۳- اثر CVT و TCSC در عملکرد رله دیستانس در ناحیه سوم

در این حالت نتایج مندرج در جدول (۶) نیز نشان می‌دهد

#### ۵- اثر مقاومت خطا بر کاهش دقت عملکرد رله

در این قسمت اثر خطاهای مختلف بر روی درصد خطای ناشی از عملکرد رله دیستانس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

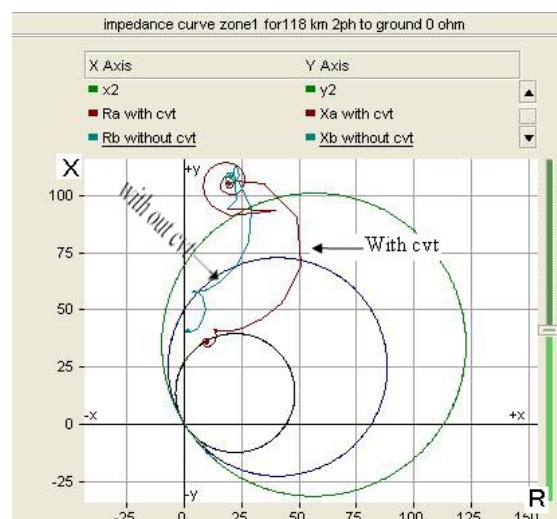
#### ۵-۱- اثر CVT و TCSC در عملکرد رله دیستانس در ناحیه اول

همانطور که نتایج بدست آمده در جدول (۵) نشان می‌دهد، در حالت اتصال کوتاه دو فاز به زمین، بیشترین درصد خطا به میزان ۴۷/۵٪ می‌باشد که با افزایش مقاومت خطا مقدار آن کاهش یافته و به ۶/۲۵٪ می‌رسد. به عبارت دیگر افزایش مقاومت خطا باعث جبران خطای CVT می‌شود.

جدول (۵): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه اول به ازای انواع خطای مختلف

| اتصال کوتاه | سه فاز | دو فاز | تک فاز | دو فاز به زمین |
|-------------|--------|--------|--------|----------------|
| بدون مقاومت | ۱۲٫۵٪  | ۶٫۲۵٪  | ۶٫۲۵٪  | ۴۷٫۵٪          |
| ۱۰ Ω        | -      | ۶٫۲۵٪  | ۵٪     | ۶٫۲۵٪          |
| ۱۰۰ Ω       | -      | ۷٫۵٪   | ۶٫۲۵٪  | ۶٫۲۵٪          |

منحنی تغییرات امپدانس در این حالت در شکل (۳) نشان داده شده است.





انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران  
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت

جدول (۸): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه اول با

مقاومت سلفی برای حالات مختلف

| اتصال کوتاه سلفی | تک فاز | دو فاز به زمین |
|------------------|--------|----------------|
| ۱۰Ω              | ٪۱۲/۵  | ٪۳۷/۵          |
| ۱۰۰Ω             | ٪۱۰    | ٪۳۱/۲۵         |

جدول (۹): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه دوم با

مقاومت سلفی برای حالات مختلف

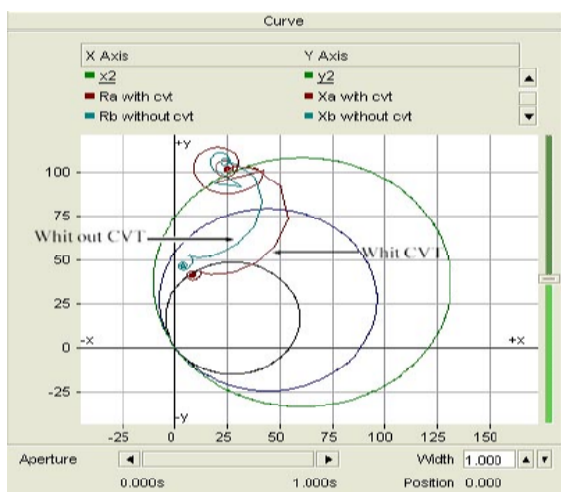
| اتصال کوتاه سلفی | تک فاز | دو فاز به زمین |
|------------------|--------|----------------|
| ۱۰Ω              | ٪۹/۳   | ٪۲۳            |
| ۱۰۰Ω             | ٪۱۰/۶  | ٪۹/۶           |

جدول (۱۰): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه سوم با

مقاومت سلفی برای حالات مختلف

| اتصال کوتاه سلفی | تک فاز | دو فاز به زمین |
|------------------|--------|----------------|
| ۱۰               | ٪۸/۸   | ٪۱۴/۶          |
| ۱۰۰              | ٪۲۳/۱  | ٪۱۵/۵          |

همان طور که ملاحظه می گردد در این حالت نیز خطای دو فاز به زمین باعث ایجاد بیشترین درصد خطا در تعیین محل خطا می شود. شکل های (۶) تا (۸) نیز وضعیت مربوط به بدترین حالات متناظر با جداول (۸) تا (۱۰) را نشان می دهد.



شکل (۶): منحنی تغییرات امپدانس خطای دو فاز به زمین سلفی در ناحیه اول با اتصال کوتاه ۱۰ اهم

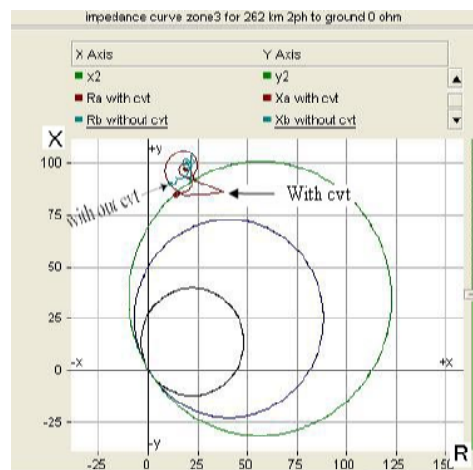
که خطای دو فاز به زمین بدون مقاومت دارای بیشترین درصد خطا به میزان ۱۶/۴٪ می باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۶): درصد خطای عملکرد رله دیستانس در ناحیه سوم به ازای

انواع خطای مختلف

| اتصال کوتاه مقاومت | سه فاز | دو فاز | تک فاز | دو فاز به زمین |
|--------------------|--------|--------|--------|----------------|
| بی مقاومت          | ٪۴,۴   | ٪۴,۴   | ٪۸,۸   | ٪۱۶,۴          |
| ۱۰Ω                | -      | ٪۴,۴   | ٪۶,۶   | ٪۶,۶           |
| ۱۰۰Ω (مقاومت بالا) | -      | ٪۱۰,۶  | ٪۴,۴   | ٪۱۱            |

منحنی تغییرات امپدانس در این حالت در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): منحنی تغییرات امپدانس با خطای دوفاز به زمین مقاومتی با اتصال کوتاه بی مقاومت در ناحیه سوم

## ۶- اثر مقاومت سلفی زمین بر عملکرد رله

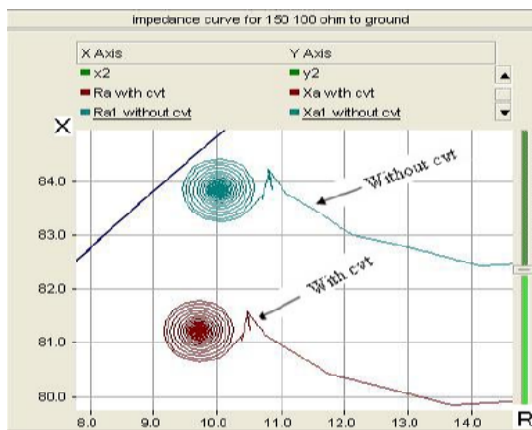
برای بررسی در سیستم هایی که نقطه صفر ژنراتور توسط یک سلف به زمین متصل شده، اتصال کوتاه با مقاومت سلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت مقادیر مقاومت سلف از ۱۰ تا ۱۰۰ اهم به عنوان سلف امپدانس بالا تغییر کرده و نتایج درصد خطا برای زون های مختلف رله دیستانس در جداول (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است.



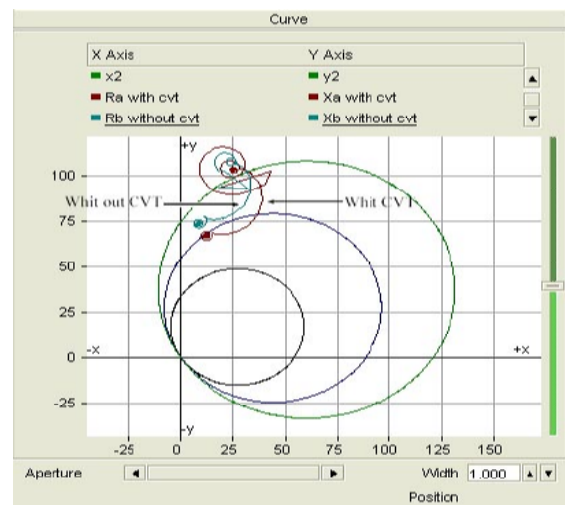
انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران  
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت



شکل (۱۰): نحوه تغییرات امپدانس در دو حالت اتصال کوتاه سلفی



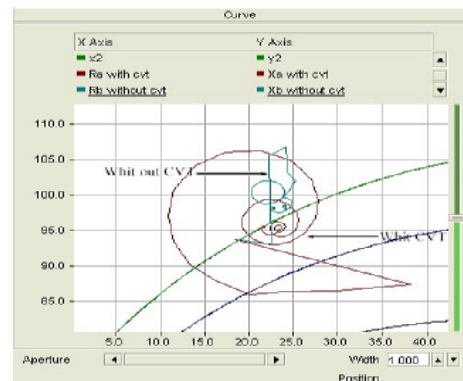
شکل (۷): منحنی تغییرات امپدانس خطای دو فاز سلفی در ناحیه دوم با اتصال کوتاه ۱۰ اهم

#### ۷- نوسانات منحنی در نقطه پایدار خطا

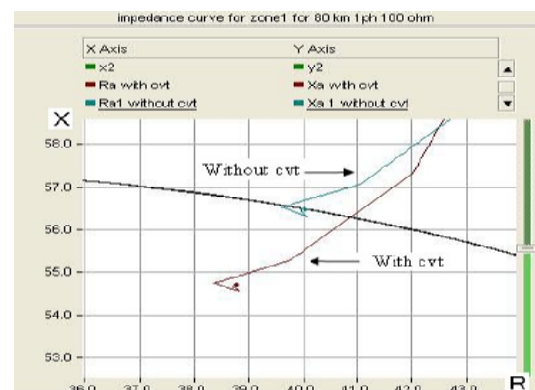
نحوه تغییرات امپدانس در دو حالت اتصال کوتاه مقاومتی و سلفی در نقطه پایدار خطا در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه گردد، در حالت سلفی تغییرات امپدانس خطا نسبت به حالت مقاومتی دارای تغییرات گذرای بیشتری است.

#### ۸- نتایج

در تحقیق صورت گرفته نشان داده شده که بیشترین درصد خطای مربوط به اتصال کوتاه دو فاز به زمین بدون مقاومت برای نواحی مختلف می‌باشد که در ناحیه اول بیشترین مقدار آن به ۴۷/۵٪ می‌رسد، در صورتی که خطا به صورت مقاومتی باشد، مقدار درصد خطا کاهش می‌یابد و می‌توان گفت که امپدانس خطا باعث جبران خطای اندازه‌گیری می‌شود. در حالت مقاومت سلفی نیز نتایج مشابه حالت مقاومتی بدست می‌آید، با این تفاوت که در نقطه پایدار خطا، تغییرات امپدانس خطا دارای حالت گذرای بیشتری بوده و در مدت زمان طولانی‌تری به حالت پایدار خود می‌رسد.



شکل (۸): منحنی تغییرات امپدانس خطای دو فاز سلفی در ناحیه سوم با اتصال کوتاه ۱۰۰ اهم



شکل (۹): نحوه تغییرات امپدانس در دو حالت اتصال کوتاه مقاومتی

#### مراجع

- [۱] دکتر مجتبی خدرزاده، مهندس علی صفر نور الله، مهندس مرتجی، دکتر محمد همدانی گلشن، «مبانی حفاظت سیستم‌های قدرت» چاپ اول، ناشر: موسسه آموزش عالی عملی - کاربردی صنعت آب و برق،



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران  
شاخه ی تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت

[ ] دکتر حسين عسگریان ابیانه، مهدی طالشیان جلودار، «حفاظت و رله»  
چاپ دوم، نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

[۳] B.Kastenny, M. M. S aha, Member ,  
“Dynamic compensation of capacitive voltage  
transformers”, IEEE Transactions on ,Power  
Delivery, vol ۱۳, No.۱. Jan ۱۹۹۸.

[۴] Milan Graovac , Reza Iravani , IEEE “Fast  
FerroreSonance Suppression of Coupling Capacitor  
Voltage Transformers” IEEE Trabsaction on Power  
Delivery , Vol . ۱۸ , No.۱ , January ۲۰۰۳

[۵]. H . J.V.evmeulen, P,Davel ,”Voltage Harmonic  
Distortion Measurements Using Capacitie Voltage  
Transformers”,vol ۲, No.۲, Sep ۱۹۹۶

[۶]Xinzhou Dong , Bin Su , “Study on Voltage  
Traveling Wave Wavefront Detection for CVT” ,  
Transmission and Distribution Conference and  
Exhibition,Asia and Pacific, ۲۰۰۵ IEEE/PES, Aug  
۲۰۰۵

[ ] Benteng He, Yiquan Li, and Zhiqian Q. Bo,”An  
adaptive distance relay based on transient error  
estimation of CVT”, IEEE Transactions on ,Power  
Delivery, vol ۲۱, No ۱, pp ۱۸۵۶- ۱۸۶۱, Oct ۲۰۰۶