

بررسی تاثیر کنترل کننده توزیع شده پخش توان بر رله دیستانس

هادی امیری مقدم^(۱) - مهدیه اسلامی^(۲) - هادی زاینده رودی^(۲)

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱۷

خلاصه: تلاش‌های اخیر به منظور بالا بردن ظرفیت انتقال توان و افزایش سطح پایداری شبکه، موجب شده تا استفاده از عناصر سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر^۱ در سیستم قدرت افزایش یابد. سیستم حفاظتی که یکی از مهم‌ترین قسمت‌های عملکرد سیستم قدرت می‌باشد، به طور جدی از این ادوات تأثیر می‌پذیرد، از اینرو مطالعه آنها ضروری به نظر می‌رسد. از میان رله‌های حفاظتی، حفاظت دیستانس به دلیل سرعت بالا کارکرد مناسب در شرایط مختلف شبکه به عنوان حفاظت اصلی خطوط انتقال به کار می‌روند. در نتیجه احتمال اینکه خطوط جبران شده با سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر، توسط رله‌های دیستانس حفاظت شوند، اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله به بررسی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده توزیع شده پخش توان^۲ پرداخته شده است و سپس اثر این ادوات بر امپدانس اندازه‌گیری شده و مشخصه قطع رله دیستانس نشان داده شده است. همچنین در این مقاله نشان داده شده که علاوه بر متأثر شدن امپدانس دیده شده از طرف رله به دلیل تغییرات سیستم قدرت، نوع سیستم کنترل و تنظیم پارامترهای این ادوات تأثیرات متفاوت و پیچیده‌ای بر امپدانس دیده شده از طرف رله خواهند گذاشت. جهت بررسی اثر ادوات کنترل‌کننده توزیع شده پخش توان بر حفاظت دیستانس خطوط انتقال انرژی و همچنین تأثیر امپدانس دیده شده از طرف رله به علت حضور و نوع سیستم کنترلی که کنترل‌کننده توزیع شده پخش توان با آن کار می‌کند، از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC برای مدل کردن این جبران‌سازها استفاده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل‌کننده توزیع شده پخش توان، رله دیستانس، افزایش/کاهش برد.

Performance of Distance Relays in the Presence of Distributed Power Flow Controllers

Hadi Amiri Moghadam⁽¹⁾ – Mahdiah Eslami⁽²⁾ – Hadi Zayandehroodi⁽²⁾

(1) PhD student- Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran

Hadi_amiri_m@yahoo.com

(2) Assistant Professor- Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran

Mahdiah_eslami@yahoo.com

h.zayandehroodi@yahoo.com

Recent efforts to increase power transmission capacity and level of network stability have increased the use of Flexible AC Transmission Systems elements in the power system. The protective system, which is one of the most important parts of the power system's operation, is seriously affected by these devices, so their study is considered necessary. Among protection relays, the protection of the distances due to high speed, proper operation in different network conditions are used as the main protection of transmission lines. Consequently, it is inevitable that the lines compensated by flexible AC systems are protected by long-range relays. In this paper, the Distributed Power Flow Controller has been investigated and simulated, and then the effect of these devices on the measured impedance and the characteristic of the disturbance relay is shown. It is also shown that in addition to the effects of the impedance seen on the relay due to changes in the power system, the type of control system and the adjustment of the parameters of these devices have different effects on the impedance seen by the relay. To investigate the effect of controller distributed power distribution on the protection of the energy transmission distances, as well as the effect of the impedance seen on the relay due to the presence and type of control system that the distributed power controller works with, the PSCAD / EMTDC software has been used for modeling these compensators.

Index Terms: Distributed power flow controller, distance relay, range increase/decrease

۱- مقدمه

FACTS سری پیشرفته را پیشنهاد می‌دهد. در نتیجه با توجه به مطالعات، مشخصه‌های رله‌های حفاظتی با حضور ادوات FACTS در خطوط انتقال نیاز به بهینه‌سازی و اصلاح دارند.

با حذف شاخه مشترک dc بین مبدل موازی و مبدل سری در UPFC و همچنین شکستن مبدل سری سه فاز به چندین مبدل سری تکفاز که در طول خط انتقال توزیع شده‌اند. با اجرای دو تغییر اساسی در ساختار UPFC ساختار جدیدتر DPFC به دست می‌آید [۱۲]. البته هر یک از مبدل‌های DPFC دارای خازن‌های جداگانه‌ای برای تأمین ولتاژ dc خود می‌باشند. توان اکتیو بین مبدل موازی و مبدل‌های سری از طریق خط انتقال و در هارمونیک سوم صورت می‌گیرد. DPFC مانند UPFC، قابلیت کنترل همه پارامترهای سیستم را داراست. ساختار DPFC در شکل (۱) نمایش داده شده است.

نتایج تحلیلی بر پایه مؤلفه‌های متقارن برای خطاهای تک فاز به زمین، سه فاز و خطای دو فاز به هم با حضور DPFC در خط انتقال ارائه شده است.

هدف از ارائه این مقاله، بررسی تأثیرات DPFC بر عملکرد رله دیستانس و نشان دادن اهمیت در نظر گرفتن این تأثیرها بر تنظیمات رله دیستانس است. در این مقاله، اثرات دامنه و فاز ولتاژ تزریقی توسط مبدل‌های سری توزیع شده در خطوط انتقال بر رله دیستانس به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ساختار DPFC

اساس کار DPFC بر حذف خازن DC مشترک و استفاده از جریان هارمونیک سوم برای انتقال توان اکتیو می‌باشد.

۲-۱- حذف خازن DC مشترک و انتقال توان

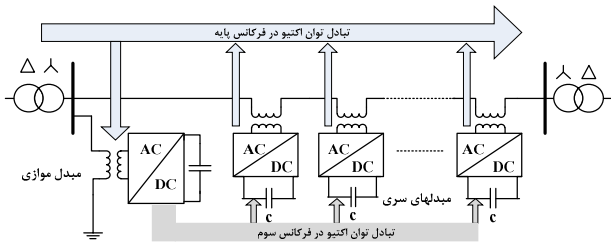
در DPFC خط انتقال به عنوان یک اتصال مشترک بین خروجی‌های ac مبدل‌های موازی و سری عمل می‌کند. این روش بر اساس تئوری توان مؤلفه‌های غیر سینوسی می‌باشد. بر اساس آنالیز فوریه، ولتاژها و جریان‌های غیر سینوسی را می‌توان به صورت مؤلفه‌های سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت دسته‌بندی و جمع کرد. از مقدار میانگین حاصل ضرب مؤلفه‌های ولتاژ و جریان، توان اکتیو به دست می‌آید. با توجه به اینکه ضرب داخلی مؤلفه‌های دارای فرکانس‌های مختلف صفر خواهد شد، پس توان اکتیو از رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$p = \sum_{i=1}^{\infty} V_i I_i \cos \varphi_i \quad (1)$$

به طوری که V_i و I_i مؤلفه‌ی ولتاژ و جریان هارمونیک i ام هستند و φ_i نیز زاویه‌ی بین ولتاژ و جریان در این فرکانس است. رابطه (۱) این نکته را بیان می‌کند که توان‌های اکتیو در مؤلفه‌های فرکانسی مختلف به طور مستقل از یکدیگر می‌باشند.

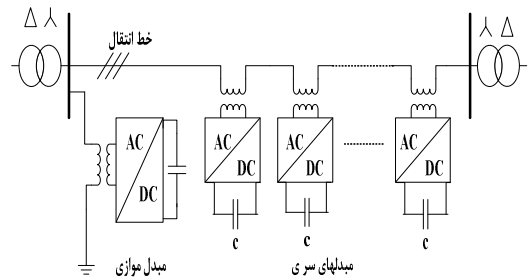
در سال‌های اخیر به منظور بهره‌وری بیشتر از سیستم‌های قدرت موجود، ادوات توزیع شده (D-FACTS)^۲ جدیدی معرفی شده است [۱]. هدف اصلی استفاده از ادوات D-FACTS مانند (DPFC)^۱، علاوه بر دارا بودن تمام خصوصیات ادوات FACTS، هزینه پایین‌تر، کنترل‌پذیری، قابلیت اطمینان و پایداری بیشتر می‌باشد [۱]. نکته قابل توجه آن است که پس از بکار بردن عناصر FACTS تغییراتی در شبکه‌های قدرت ایجاد می‌گردد. سه پارامتر مهم در مورد تأثیر ادوات FACTS بر عملکرد رله‌ها را می‌توان محل نصب در خط، پارامترهای این عناصر و سیستم کنترلی آنها عنوان کرد. مطالعات زیادی در مورد بررسی عملکرد رله دیستانس در حضور ادوات FACTS در خطوط انتقال صورت گرفته است [۲]، [۳]. در مرجع [۳] اثر ادوات FACTS موازی بر عملکرد رله دیستانس بررسی شده است. در این مقاله (SVC)^۵ و (STATCOM)^۶ در وسط خط نصب شده‌اند. اثر این دو عنصر با روش‌های مختلف بر عملکرد حفاظت دیستانس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر ادوات FACTS سری بر امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳] تأثیر (TCSC)^۷ بر حفاظت خط انتقال ارزیابی شده است. علاوه بر این، تأثیر TCSC بر خطوط مجاور نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر تغییر پارامترهای کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان (UPFC)^۸ که ترکیبی از ادوات FACTS سری و موازی است در مرجع [۴] مورد ارزیابی قرار گرفته است. قرارگیری DPFC در سیستم قدرت نیز سبب عملکرد اشتباه رله‌ها می‌گردد. هر چند اثرات DPFC بر دیگر قسمت‌های سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است اما مطالعات قابل توجهی در مورد تأثیر این عنصر بر عملکرد رله دیستانس صورت نگرفته است. در [۵] اثرات STATCOM بر عملکرد رله دیستانس بررسی شده است که STATCOM و رله دیستانس در حالت ماندگار مورد تحلیل قرار گرفته است. و همچنین در [۶] عملکرد رله دیستانس با حضور STATCOM مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر SVC و STATCOM بر عملکرد حفاظت دیستانس در مرجع [۷] در شرایط متفاوت سیستم و خطاهای مختلف زمانی که این ادوات در وسط خط به منظور کنترل ولتاژ نقطه میانی نصب شده‌اند مورد بحث قرار گرفته است. این ادوات در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده‌اند تا اثرشان بر رله دیستانس بررسی شود سپس از دستگاه شبیه‌سازی رله دیستانس به منظور تأیید نتایج استفاده شده است. در مرجع [۷] نیز همین مطالعات انجام شد و این تأثیرات در شرایط مختلف با هم مقایسه شد.

مطالعات متعددی برای UPFC انجام شده است که از جمله آن می‌توان به مرجع [۸] رجوع کرد که در این مقاله اثرات مبدل موازی UPFC یعنی STATCOM و مبدل سری آن به طور جداگانه و با هم بر عملکرد رله دیستانس مورد تحلیل قرار گرفته است. در مراجع [۹] و [۱۰] نیز اثرات UPFC مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام شده در [۱۱]، حفاظت تطبیقی برای خط انتقال در حضور ادوات



شکل (۲): چگونگی تبادل توان اکتیو در فرکانس‌های مختلف بین مبدل موازی و سری DPFC

Fig. (2): Exchange of active power at different frequencies between parallel and series DPFC converters

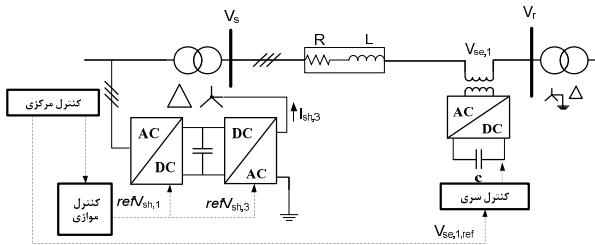


شکل (۱): ساختار DPFC
Fig. (1): DPFC structure

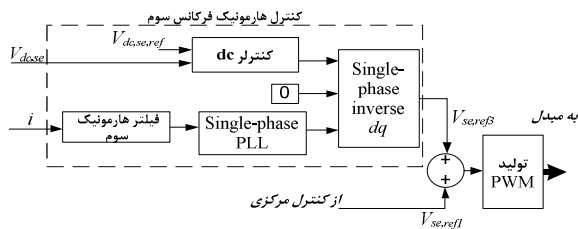
۲-۲-۳- کنترل کننده موازی

مبدل موازی شامل یک مبدل سه فاز است که به صورت پشت به پشت به یک مبدل تکفاز وصل شده است. مبدل سه فاز مانند STATCOM می‌باشد که به قسمت ولتاژ پایین ترانسفورماتور $Y-\Delta$ وصل می‌شود و توان حقیقی را از شبکه می‌کشد. مبدل تکفاز در ترمینال خروجی خود بین زمین و نقطه خنثی ترانسفورماتور $Y-\Delta$ وصل است و جریان هارمونیک سوم تزریق می‌کند. وقتی ثانویه ترانسفورماتور سیم‌پیچی مثلث (Δ) باشد، جریان هارمونیک سوم در آن قفل می‌شود و نمی‌تواند رد شود؛ بنابراین جریان منبع که شامل هارمونیک نیز می‌باشد پس از عبور از ترانسفورماتور $Y-\Delta$ در شاخه موازی، فقط به صورت جریان هارمونیک پایه به مبدل سه فاز موازی می‌رسد. مؤلفه‌های این مبدل، $I_{sh,1}$ و $V_{sh,1}$ هستند.

شکل (۵) ساختار کنترل کننده موازی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): ساختار کنترلی DPFC
Fig. (3): DPFC controller structure



شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل مبدل سری
Fig. (4): Block diagram of the series converter control

مستقل بودن توان اکتیو در فرکانس‌های مختلف این قابلیت را ایجاد می‌کند که یک مبدل بتواند توان اکتیو را در یک فرکانس تولید (بدون نیاز به منبع قدرت) و همین اندازه توان را از فرکانس‌های دیگر جذب کند. با عمل این روش مبدل موازی DPFC، می‌تواند توان اکتیو را از شبکه در فرکانس پایه جذب و آن را در هارمونیک سوم به شبکه تزریق کند. این توان اکتیو هارمونیک سوم در طی خط انتقال جریان می‌یابد. بر اساس توان اکتیو مورد نیاز در هارمونیک پایه، مبدل‌های سری DPFC با جذب توان اکتیو هارمونیک سوم از روی خط انتقال، ولتاژ مورد نیاز را در فرکانس پایه تزریق می‌کنند. اگر از تلفات صرف‌نظر کنیم، توان اکتیو تولیدی در هارمونیک پایه با توان جذب شده در هارمونیک سوم برابر خواهند بود [۱۲] [۱۳].

شکل (۲) چگونگی تبادل توان حقیقی بین مبدل موازی و سری را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- ساختار کنترلی DPFC

DPFC دارای سه کنترل کننده می‌باشد: کنترل کننده مرکزی، کنترل کننده سری و کنترل کننده موازی (شکل (۳)).

۲-۲-۱- کنترل کننده مرکزی

این کنترل کننده همه کنترل کننده‌های سری و موازی را کنترل می‌کند و سیگنال‌های مرجع را به این کنترلرها می‌فرستد [۱۴].

۲-۲-۲- کنترل کننده سری

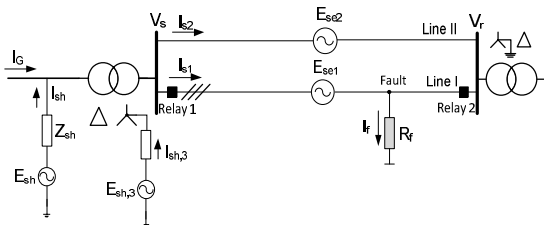
هر مبدل تکفاز سری در طول خط دارای یک کنترل کننده سری مجزا است. ورودی‌های این کنترل کننده ولتاژهای خازن سری، جریان خط و ولتاژ سری مرجع به فرم dq هستند. هر کنترل کننده سری دارای یک فیلتر پایین‌گذر و یک فیلتر هارمونیک سوم به منظور ایجاد جریان مؤلفه اصلی و جریان هارمونیک سوم، هستند. از دو PLL^۱ تکفاز برای گرفتن اطلاعات فاز و فرکانس از شبکه، استفاده شده است [۱۵]. بلوک دیاگرام یک کنترل کننده سری در شکل (۴) نشان داده شده است.

که:

$$\sigma_1 = Z_{IL2} / Z_{IL1} \quad (5)$$

در نتیجه با استفاده از معادلات ۳ و ۴ توالی مثبت ولتاژ به صورت زیر به دست می آید:

$$V_{1s} = xI_{1s1}Z_{IL1} + V_{1F} + E_{1se1} + \frac{R_f}{1-x} (I_{1s1} + \frac{E_{1se1} - E_{1se2}}{Z_{IL1}} - \sigma_1 I_{1s2}) \quad (6)$$

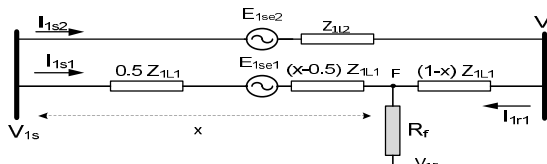


شکل (۶): مدل DPFC
Fig. (6): DPFC model

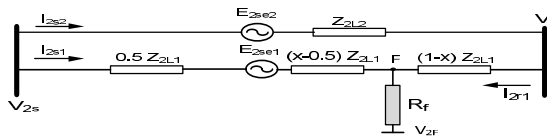
به دنبال آن توالی‌های صفر و منفی ولتاژ با توجه به شکل (۷) به طور مشابه به دست می آید:

$$V_{2s} = xI_{2s1}Z_{IL1} + V_{2F} + E_{2se1} + \frac{R_f}{1-x} (I_{2s1} + \frac{E_{2se1} - E_{2se2}}{Z_{IL1}} - \sigma_1 I_{2s2}) \quad (7)$$

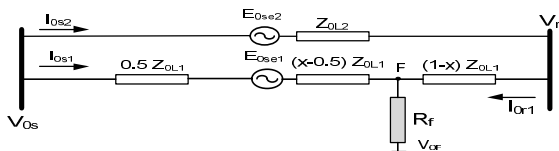
$$V_{0s} = xI_{0s1}Z_{OL1} + V_{0F} + E_{0se1} + \frac{R_f}{1-x} (I_{0s1} + \frac{E_{0se1} - E_{0se2}}{Z_{OL1}} - \sigma_0 I_{0s2}) \quad (8)$$



(الف) (A)



(ب) (B)

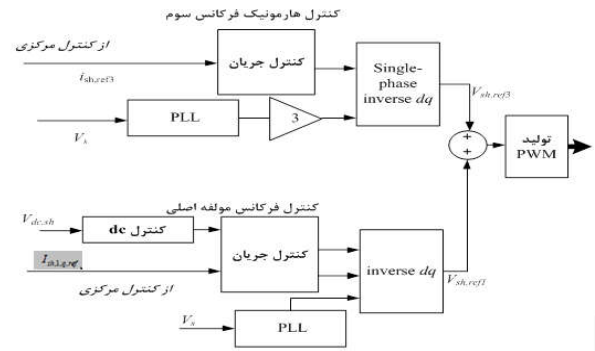


(پ) (C)

شکل (۷): توالی فاز سیستم، (الف) توالی فاز مثبت، (ب) توالی فاز منفی و (پ) توالی فاز صفر

Fig. (7): System phase sequence: A) positive phase sequence; B) negative phase sequence; C) zero phase sequence

که:



شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترل مبدل موازی

Fig. (5): Block diagram of the parallel converter control diagram

۳-۲- مزایای DPFC

DPFC علاوه بر دارا بودن مزایای مذکور دارای مزایای دیگری می باشد [۱۶]. مزایایی همچون:

- کنترل پذیری بالا: DPFC به طور همزمان می تواند تمام پارامترهای شبکه انتقال را کنترل نماید، از جمله: امپدانس خط، زاویه انتقال و ولتاژ باس.
- قابلیت اطمینان مناسب: تکرار مبدل‌های سری در طول خط، بدون افزایش قیمت، قابلیت اطمینان را بالا می برد. در ضمن مبدل موازی و مبدل‌های سری مستقل از هم عمل می کنند پس ناکامی در عملکرد یکی روی دیگری تأثیر نمی گذارد.
- هزینه پایین: نیازی به عایق بندی فاز به فاز برای مبدل‌های سری هر فاز نمی باشد. مقدار توان هر مبدل سری پایین است. حتی اگر سیستم قدرت به STATCOM مجهز باشد، با نصب تعدادی مبدل سری می توان آن را به DPFC تبدیل کرد.

۳- محاسبه امپدانس ظاهری با حضور DPFC

امپدانس ظاهری با استفاده از جریان و ولتاژ عبوری از رله محاسبه می شود [۱۷]. اثر عناصر FACTS بر روی امپدانس ظاهری بستگی به محل نصب آنها و محل وقوع خط دارند. در این مقاله، DPFC به دلیل ساختاری که دارا می باشد، در محل رله نصب می شود. مبدل موازی آن باید ابتدای خط و قبل از ترانسفورماتور Y-Δ نصب شود، به همین دلیل DPFC همیشه در حلقه خطا قرار می گیرد (شکل ۶). در شکل ۷ توالی‌های صفر، مثبت و منفی در سیستم مورد مطالعه جهت خطا در خط ۱، نشان داده شده است.

ولتاژ اندازه گیری شده در محل رله در باس S به صورت زیر است:

$$V_{1s} = xI_{1s1}Z_{IL1} + V_{1F} + E_{1se1} + R_f(I_{1s1} + I_{1r1}) \quad (2)$$

$$V_{1s} = Z_{IL2}I_{1L2} + (1-x)Z_{IL1}I_{1r1} + R_f(I_{1s1} + I_{1r1}) + V_{1F} + E_{1se2} \quad (3)$$

با محاسبه V_{1F} از معادله ۳ و جایگزینی در معادله ۱:

$$I_{1L1} = \frac{x}{1-x} I_{1s1} + \frac{E_{1se1} - E_{1se2}}{(1-x)Z_{IL1}} - \frac{\sigma_1}{1-x} I_{1s2} \quad (4)$$

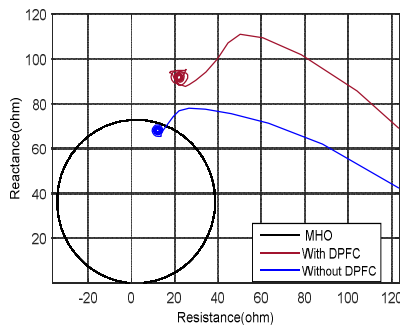
دوم معادله تأثیر ولتاژ تزریقی سری مبدل‌های سری و عبور جریان خط از مقاومت خط را نشان می‌دهد؛ که مبدل‌های سری در هر دو خط بر امپدانس خط اثر گذار خواهند بود.

۴- شبیه‌سازی تأثیر DPFC بر عملکرد رله دیستانس

برای شبیه‌سازی شبکه ساده دو سو تغذیه شکل (۶) از نرم‌افزار PSCAD برای مدل کردن سیستم انتقال ۴۰۰ کیلوولتی با DPFC نصب شده در ابتدای خطوط استفاده شده است. دو خط انتقال به طول ۳۰۰ کیلومتر و زاویه انتقال ۱۵ درجه می‌باشند که پارامترهای سیستم در قسمت ضمایم آورده شده است. DPFC با قدرت ۱۶۰-MVA که شامل دو قسمت می باشد در نظر گرفته شده است، مبدل موازی در ابتدای خطوط و قبل از ترانسفورماتور نصب شده است و مبدل‌های سری آن در وسط خط ۱ و ۲ نصب شده‌اند.

۴-۱- تأثیر خطای تکفاز به زمین بر عملکرد رله دیستانس

در شکل (۸) تأثیر DPFC بر امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله را می‌توان مشاهده کرد. خطا در ۲۳۰ کیلومتری از محل رله در خط ۱ رخ می‌دهد. در این مورد ولتاژ مبدل موازی DPFC بر روی ۱ پیرونیت و مبدل‌های سری آن روی ۴۰ کیلو ولت و ۱۵ درجه تنظیم شده‌اند.



شکل (۸): اثر DPFC بر امپدانس دیده شده برای خطای تکفاز
Fig. (8): Effect of DPFC on the single-phase impedance

از شکل می‌توان مشاهده کرد که رله دیستانس خطا را در ناحیه ۱ خود به دلیل اثر مبدل‌های سری DPFC، نمی‌بیند. در این حالت، مؤلفه ولتاژ توالی صفر تزریقی توسط مبدل سری بعد از رخ دادن خطا افزایش می‌یابد. در نتیجه E_{0se1} مؤلفه اصلی E_{se1} در معادله (۱۵) را تشکیل می‌دهد.

۴-۲- تأثیر خطای فاز به فاز (B-C)

در طول یک خطای فاز به فاز ولتاژ ورودی به رله، ولتاژ خط به خط و جریان ورودی به رله اختلاف جریان خط است. منحنی شکل ۹ امپدانس ظاهری دیده‌شده به وسیله رله را در حضور DPFC با زمانی که DPFC در شبکه نیست برای خطای فاز BC مقایسه کرده است. همان طور که در شکل (۹) مشخص است امپدانس ظاهری نسبت به زمانی که DPFC در خط وجود ندارد افزایش محسوسی داشته است. این موضوع را می‌توان به علت افت شدید ولتاژ و در نتیجه تزریق ولتاژ سری دانست و همان طور که پیش از این توضیح داده شد ولتاژ سری

$$\sigma_0 = Z_{0L2} / Z_{0L1} \quad (9)$$

۳-۱- خطای تکفاز به زمین

برای خطای تک فاز به زمین، امپدانس ظاهری رله دیستانس بدون حضور DPFC توسط معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$Z = \frac{V_s}{I_{s1} + \frac{Z_{0L1} - Z_{1L1}}{Z_{1L1}} I_{0s1}} = \frac{V_s}{I_{relay}} \quad (10)$$

این معادله نشان‌دهنده رابطه‌ای ایده‌آل برای حالتی که مقاومت خطا وجود نداشته باشد و از تلفات خازنی خطوط صرف‌نظر شود می‌باشد [۱۴].

از طرفی معادلات زیر را می‌توان برای خطای تکفاز به زمین بکار برد.

$$V_{0F} + V_{1F} + V_{2F} = 0 \quad (11)$$

با استفاده از معادلات (۶-۸) و (۱۱) خواهیم داشت:

$$V_s = xI_{s1}Z_{1L1} + x(Z_{0L1} - Z_{1L1})I_{0s1} + \frac{R_f}{1-x} [I_{s1} - \sigma_1 I_{s2} + (\sigma_1 - \sigma_0)I_{0s2}] + \Delta V_s \quad (12)$$

با توجه به معادلات توالی‌های صفر، مثبت و منفی خواهیم داشت:

$$\Delta V_s = E_{se1} + \frac{R_f}{(1-x)} \quad (13)$$

$$\left[\frac{E_{se1} - E_{se2}}{Z_{1L1}} + (E_{0se1} - E_{0se2}) \left(\frac{1}{Z_{0L1}} - \frac{1}{Z_{1L1}} \right) \right]$$

در یک سیستم سه فاز، مؤلفه‌ی هارمونیک سوم در هر فاز، یک مؤلفه‌ی توالی صفر می‌باشد، به دلیل قرار گرفتن DPFC در محل نصب رله، این جریان توالی صفر از رله عبور کرده و تأثیری در امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس نخواهد داشت و تنها تأثیر DPFC بر امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس، ولتاژ تزریقی توسط مبدل‌های سری DPFC است. در نتیجه با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۲)، امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس با حضور DPFC به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$Z = xZ_{1L1} + \frac{R_f}{(1-x)I_{relay}} (I_{s1} - \sigma_1 I_{s2} + (\sigma_1 - \sigma_0)I_{0s2}) + \Delta Z \quad (14)$$

از رابطه (۱۴)، امپدانس ظاهری دیده شده رله دیستانس را می‌توان به سه قسمت تقسیم کرد. یک قسمت امپدانس توالی مثبت از محل رله تا محل خطا، قسمت دوم مربوط به وجود مقاومت خطا در سیستم است و قسمت آخر خطا در امپدانس ظاهری (ΔZ) مربوط به حضور DPFC در سیستم انتقال است و برابر است با:

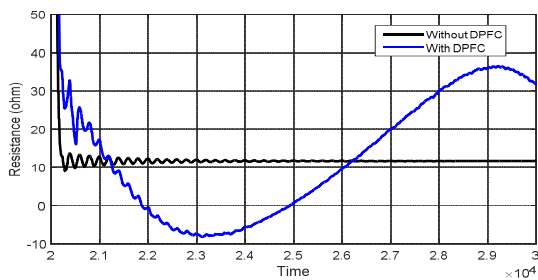
$$\Delta Z = \frac{E_{se1}}{I_{relay}} + \frac{R_f}{(1-x)I_{relay}} \left[\frac{E_{se1} - E_{se2}}{Z_{1L1}} + (E_{0se1} - E_{0se2}) \left(\frac{1}{Z_{0L1}} - \frac{1}{Z_{1L1}} \right) \right] \quad (15)$$

قسمت اول معادله (۱۵) بیانگر خطا در امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده به دلیل حضور مبدل سری DPFC در خط ۱ می‌باشد. قسمت

۴-۴-۱ تأثیر زاویه فاز ولتاژ کنترلی مبدل سری

در این شبیه‌سازی با اعمال خطا تک فاز به زمین در ۸۰٪ خط ۱ یعنی نقطه‌ای در مرز zone ۱ رله دیستانس، زاویه فاز متغیر برای ولتاژ تزریقی مبدل سری DPFC در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۱۱) - (۱۳) به ترتیب مقاومت، راکتانس و امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله برای زاویه فاز متغیر از صفر تا ۳۶۰ درجه که به صورت خطی نسبت به زمان تغییر می‌کند، نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی انجام شده هر مبدل دارای یک خازن dc جداگانه است و هیچ منبع ذخیره‌کننده انرژی که DPFC را قادر به تبادل توان اکتیو کند، وجود ندارد. به همین علت تبادل توان اکتیو موثر DPFC با سیستم صفر است. با تغییر زاویه تنظیمی مبدل‌ها توان اکتیو جذب یا تولید می‌کنند، با افزایش جذب توان اکتیو از شبکه، مقدار مقاومت دیده شده توسط رله افزایش می‌یابد. این تغییرات را به این صورت می‌توان توجیه کرد که با جذب توان اکتیو از شبکه، مبدل سری مانند یک بار مصرف‌کننده عمل خواهد کرد و باعث افزایش مقاومت دیده شده توسط رله می‌شود و بالعکس زمانی که به شبکه توان اکتیو تزریق می‌کند، باعث کاهش مقاومت دیده شده توسط رله می‌شود. اما در مورد تغییرات راکتانس می‌توان دید که با افزایش توان راکتیو تزریقی توسط مبدل سری به شبکه، حالت خازنی می‌یابد و در نتیجه موجب کاهش راکتانس دیده شده توسط رله می‌شود و بالعکس در هنگام جذب توان راکتیو از شبکه، حالت سلفی را دارا می‌باشد و در نتیجه باعث افزایش راکتانس دیده شده توسط رله می‌شود. در نتیجه با تغییر زاویه تنظیمی تزریق یا جذب توان تغییر می‌کند و در نتیجه باعث تغییر در امپدانس دیده شده توسط رله می‌شود که این مطلب با توجه به شکل‌های ۱۱، ۱۲ کاملاً قابل توجیه می‌باشد.



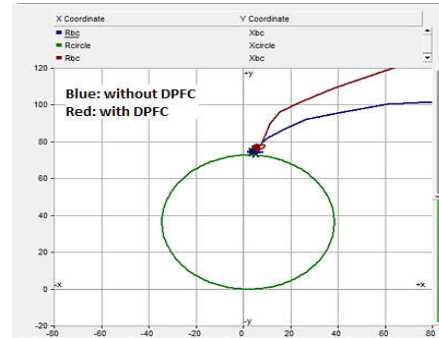
شکل (۱۱): اثر DPFC بر مقاومت دیده شده توسط رله برای خطای تکفاز برای α متغیر از ۰ تا ۳۶۰ درجه

Fig. (11): Effect of DPFC on the relay impedance with single-phase fault and α varying between 0 and 360 degrees

۴-۴-۲ تأثیر دامنه ولتاژ کنترلی مبدل سری DPFC

دامنه ولتاژ تزریقی مبدل‌های سری بر امپدانس ظاهری اثرگذار است. با توجه به شکل (۱۴)، با بالا بردن دامنه ولتاژ تزریقی، امپدانس ظاهری دیده شده نیز افزایش می‌یابد. این شکل برای خطای تکفاز به زمین در ۲۴۰ کیلومتری از محل رله در خط ۱ و با زاویه فاز ثابت می‌باشد.

تزریقی باعث افزایش امپدانس دیده شده توسط رله می‌شود. تزریق توان راکتیو زیاد از طرف مبدل موازی DPFC تأثیری در عملکرد رله دیستانس ندارد. در حین خطای فاز به فاز، به دلیل وجود ادوات FACTS، راکتانس ظاهری افزایش می‌یابد، ولی برخلاف خطای تک فاز به زمین، مقاومت ظاهری کاهش می‌یابد از این رو رله دیستانس به خوبی نمی‌تواند عمل کند. اگر از مشخصه ۴ ضلعی به عنوان محدوده رله استفاده شود، فاز سالم رله ممکن است به طور صحیح عمل نکند.

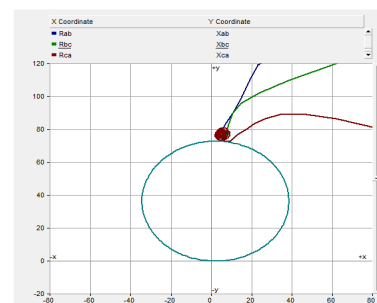


شکل (۹): امپدانس در حین خطای فاز به فاز (B-C) بدون DPFC و با DPFC

Fig. (9): Impedance during phase-to-phase fault (B-C) without DPFC and with DPFC

۴-۳-۳ خطای سه فاز (ABC)

در سیستمی که در ابتدا شرح آن رفت اگر با حضور DPFC خطای سه فاز رخ دهد، DPFC با ولتاژی که تزریق می‌کند سبب کاهش برد رله دیستانس می‌شود. در شکل ۱۰ امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله نشان داده شده است.



شکل (۱۰): امپدانس دیده شده توسط رله در خطای سه فاز با DPFC
Fig. (10): Impedance seen by the relay in a three-phase fault with DPFC

۴-۴-۴ تأثیر پارامترهای کنترلی DPFC بر عملکرد رله دیستانس

DPFC اساساً از دو بخش جدا از هم تشکیل شده است. قسمت موازی DPFC با تزریق توان راکتیو، ولتاژ باس را تنظیم می‌کند، و قسمت سری به عنوان کنترل پخش توان در خط انتقال به کار می‌رود. در کل زاویه فاز ولتاژ تزریقی، نوع کنترل‌کننده پخش توان را (ولتاژ خط انتقال، امپدانس یا زاویه) مشخص می‌کند. کنترل پخش توان به وسیله تنظیم دامنه و زاویه فاز ولتاژ سری امکان‌پذیر است.

ولتاژ تزریقی مبدل سری، ناحیه کاهش برد کم می‌شود. همچنین نشان داده شد که زاویه فاز ولتاژ تزریقی مانند دامنه ولتاژ اثر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد رله دیستانس می‌گذارد. از اینرو، برای کاهش اثر DPFC بر امپدانس اندازه‌گیری شده یک قسمت کمکی باید به رله دیستانس اضافه شود. این قسمت می‌تواند با اندازه‌گیری (ΔZ) بر اساس ولتاژ خروجی DPFC و کم کردن این مقدار از امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده، مقدار واقعی امپدانس را به دست دهد.

ضمایم

فهرست علائم

ولتاژ باس S در فرکانس آم	V_{si}
جریان گذرنده از باس S در فرکانس آم	I_{si}
ضریب توان در فرکانس آم	$\cos\phi_i$
خطا در امپدانس ظاهری	ΔZ
زاویه فاز ولتاژ تزریقی توسط مبدل سری	α
DPFC	
توالی‌های ولتاژ در محل رله در باس S	V_{1s}, V_{2s}, V_{0s}
توالی فاز ولتاژ تزریقی توسط مبدل سری در خط ۱	$E_{1se1}, E_{2se1}, E_{0se1}$
توالی فاز ولتاژ تزریقی توسط مبدل سری در خط ۲	$E_{1se2}, E_{2se2}, E_{0se2}$
توالی فاز ولتاژ خطا در نقطه F	V_{1F}, V_{2F}, V_{0F}
توالی فاز جریان گذرنده از خط ۱ از باس S	$I_{1s1}, I_{2s1}, I_{0s1}$
توالی فاز جریان گذرنده از خط ۲ از باس S	$I_{1s2}, I_{2s2}, I_{0s2}$
توالی فاز جریان گذرنده از خط ۱ از باس R	$I_{1r1}, I_{2r1}, I_{0r1}$
توالی امپدانس‌های خط ۱	Z_{1L1}, Z_{0L1}
توالی امپدانس‌های خط ۲	Z_{1L2}, Z_{0L2}
مقاومت خطا	R_f
فاصله خطا از محل رله	X

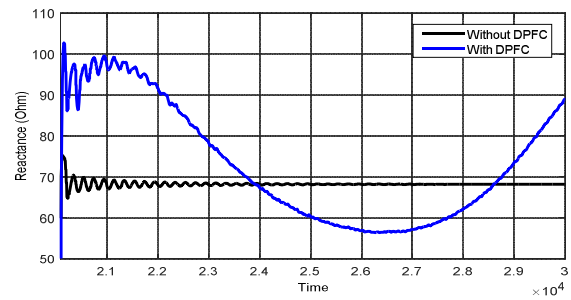
مشخصات ترانسفرماتورهای قدرت

YNd11	گروه برداری ترانس‌ها:
۴۰۰/۲۳۰	نسبت تبدیل ترانس‌ها:
۱۰،۷۱	امپدانس درصد در تپ نرمال ترانس ۱
۱۰،۸۱	امپدانس درصد در تپ نرمال ترانس ۲
۴۰۰MVA	قدرت نامی ترانس ۱
۳۰۰MVA	قدرت نامی ترانس ۲
	مقادیر امپدانس‌های خطوط

$R_1 = 0.01133$	Ω/km
$X_1 = 0.3037$	Ω/km
$R_0 = 0.1535$	Ω/km
$X_0 = 1.1478$	Ω/km

پی‌نوشت:

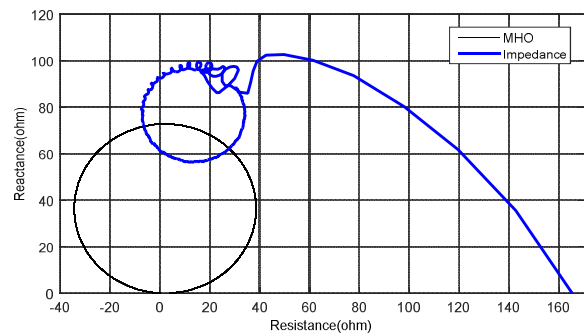
1. Flexible AC Transmission Systems
2. Distributed Power Flow Controller



شکل (۱۲): اثر DPFC بر راکتانس دیده شده توسط رله برای خطای تکفاز

برای α متغیر از ۰ تا ۳۶۰ درجه

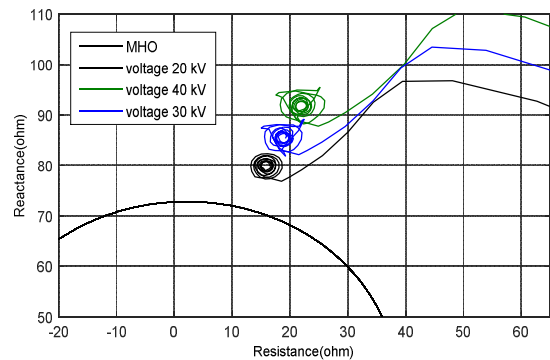
Fig. (12): Effect of DPFC on the relay reactance with single-phase fault and α varying between 0 and 360 degrees



شکل (۱۳): اثر DPFC بر امپدانس دیده شده توسط رله برای خطای تکفاز

برای α متغیر از ۰ تا ۳۶۰ درجه

Fig. (13): Effect of DPFC on the relay impedance with single-phase fault and α varying between 0 and 360 degrees



شکل (۱۴): امپدانس دیده شده توسط رله برای خطای تکفاز برای سطح

ولتاژ تزریقی متفاوت مبدل سری DPFC

Fig. (14): The relay impedance with single-phase fault for different series DPFC converter voltage injection levels

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات DPFC بر عملکرد رله دیستانس بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس علاوه بر متأثر بودن از شرایط ساختاری سیستم قدرت، از پارامترهای کنترلی DPFC نیز اثر می‌پذیرد. ولتاژ تزریقی مبدل سری DPFC باعث کاهش و یا افزایش برد رله دیستانس می‌گردد. همان‌طور که در شبیه‌سازی انجام شده نشان داده شد، با کاهش دامنه

6. Static Compensator
7. Thyristor Control Series Capacitor
8. Unified Power Flow Controller
9. Phase Lock Loop

3. Distributed Flexible AC Transmission Systems
4. Distributed Power Flow Controller
5. Static Var Compensator

References

- [1] Z. H. Yuan, S. W. H de Haan, B. Frreira, "DPFC control during shunt converter failure", Proceeding of the IEEE/ECCE, San Jose, CA, USA, pp. 2727 – 2732, Sep. 2009.
- [2] Z. Moravej, M. Pazoki, M. Khederzadeh, "Impact of UPFC on power swing characteristic and distance relay behavior", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 29, No. 1, pp. 261,268, Feb. 2014.
- [3] T. S. Sidhu, R. K. Varma, P. K. Gangadharan, F.A. Albasri, G.R. Ortiz, "Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005.
- [4] M. Khederzadeh, T.S. Sidhu, "Impact of TCSC on the protection of transmission lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp.80,87, Jan. 2006.
- [5] T.S. Sidhu, R.K. Varma, P.K. Gangadharan, F.A. Albasri, G.R. Ortiz, "Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 1837-1845, July
- [6] A.A. Fadhel, T.S. Sidhu, R.K. Varma. "Performance comparison of distance protect, Oct. 2007.
- [7] G.B. Abande, M.F.A.R. Satarkar, M.H. Rawoot, M. Thakre, V.S. Kale, "The impact of STATCOM on distance relay", Proceeding of the IEEE/ICCPCT, pp. 809-813, Nagercoil, India, March 2014.
- [8] M. Khederzadeh, "UPFC operating characteristics impact on transmission line distance protection", Proceeding of the IEEE/PES, Pittsburgh, PA, USA, pp. 1-6, July 2008.
- [9] S. Jamali, A. Kazemi, H. Shateri, "Distance relay tripping characteristic in presence of UPFC", Proceeding of the IEEE/PEDES, New Delhi, India, Dec. 2006.
- [10] X. Zhou, H. Wang, R. K. Aggarwal, P. Beaumont, "Performance evaluation of a distance relay as applied to a transmission system with UPFC", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1137–1147, July 2006.
- [11] A. Girgis, A. Sallam, A. K. El-Din, "An adaptive protection scheme for advanced series compensated (ASC) transmission lines", IEEE Trans. on Power, Vol. 13, pp. 414–420, April 1998.
- [12] Z.H. Yuan, S.W.H de Haan, B. Frreira, D. Cevoric, "A FACTS device: Distributed power flow controller (DPFC)", IEEE Trans. on Power Electronics, Oct. 2010.
- [13] S. R. Gaigowal, M.M. Renge, "Distributed power flow controller using single phase DSSC to realize active power flow control through transmission line", Proceeding of the IEEE/ICCPEIC, pp. 747 - 751, Chennai, India, Sep. 2016.
- [14] D. Amoozegar, "DSTATCOM modeling for voltage stability with fuzzy logic PI current controller", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 76, pp. 129-135, March 2016.
- [15] Y.Q. Xia, K.K. Li, A.K. David, "Adaptive relay setting for stand-alone digital distance protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 480-491, Jan. 1994.
- [16] Z. H. Yuan, S.W.H de Haan, B. Frreira, D. Cevoric, "A FACTS device: Distributed power flow controller (DPFC)", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 25, No. 10, pp. 2564 – 2572, Oct. 2010.
- [17] K. El-Arroudi, G. Joos, D.T. McGillis, "Operation of impedance protection relays with the STATCOM", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, pp. 381 – 387, April 2002.