

تحلیل استاتیکی و جایابی بهینه کنترل کننده توان چرخشی (RHFC) با در نظر گرفتن هزینه نصب آن

روشنک رضایی پور^۱، استادیار؛ احد کاظمی^۲، دانشیار

۱- گروه برق - واحد تبریز - دانشگاه آزاد اسلامی - تبریز - ایران - rezaeipour@iaut.ac.ir

۲- گروه برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - kazemi@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، تحلیل استاتیکی RHFC به عنوان یک عنصر FACTS ترکیبی جدید، بر اساس مدل سازی ریاضی جهت پخش بار بهینه بیان می شود. همچنین، نواحی عملکردی RHFC استخراج می گردد. به علاوه، مسئله بهینه سازی RHFC جهت بهینه کردن هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS به عنوان توابع هدف مسئله، بر روی شبکه های استاندارد ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE با استفاده از نرم افزارهای GAMS و MATLAB بررسی می شود. قابل توجه است که مسئله بهینه سازی، در قالب برنامه ریزی غیرخطی (NLP) و برنامه ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح (MINLP) در نرم افزارهای مذکور مدل می شود و با استفاده از حل کننده های MINOS و DICOPT حل می گردد. به منظور مشخص کردن قابلیت عملکردی RHFC، نتایج شبیه سازی با UPFC از لحاظ فنی و اقتصادی مقایسه می گردد.

واژه های کلیدی: RHFC، نواحی عملکردی، مدل سازی حالت دائم، ادوات FACTS ترکیبی، جایابی بهینه.

Steady State Analysis and Optimal Location of RHFC Considering Its Installation Cost

R. Rezaeipour¹, Assistant Professor; A. Kazemi², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran, Email: rezaeipour@iaut.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: kazemi@iust.ac.ir

Abstract: In this paper, steady state Analysis of a Rotary Hybrid Flow Controller (RHFC) as a new member of Flexible AC Transmission System (FACTS) controllers is described based on mathematical model for Optimal Power Flow. Also, operating region of RHFC is extracted. Furthermore, the optimization problem of RHFC is investigated to optimize the total fuel cost, power losses, system loadability and cost of FACTS installation as objective functions in IEEE 14-bus and 30-bus test systems using GAMS and Matlab softwares. It has been noted, that the optimization problem is modeled as (MINLP) and (NLP) problems in the mentioned softwares and solved using DICOPT and MINOS solvers. In order to highlight the operational ability of RHFC, the simulation results are compared to a Unified Power Flow Controller (UPFC) from economical and technical points of view.

Keywords: RHFC, operating region, steady state modeling, hybrid FACTS devices, optimal location.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷

نام نویسنده مسئول: روشنک رضایی پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - ضلع شرقی اتوبان پاسداران - مجتمع دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق.

۱- مقدمه

یکی از نیازهای ضروری بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به‌هم‌پیوسته، کنترل توان در حالت ماندگار و دینامیکی خصوصاً تحت شرایط بار زیاد است. از طرف دیگر لزوم اتصال شبکه‌ها به یکدیگر، افزایش پیش‌بینی‌نشده بارهای مصرفی و محدودیت در نصب خطوط جدید انتقال از عواملی هستند که کنترل توان در سیستم انتقال انرژی به‌هم‌پیوسته را یکی از مسائل مطرح در طراحی و بهره‌برداری کرده است [۱]. با ورود سامانه‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS)^۱ در سیستم‌های قدرت الکتریکی و معرفی مدار قدرت جدید برای آن‌ها دیدگاه‌های جدیدی در حل مسائل مربوط به سیستم‌های قدرت و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های انتقال در شبکه قدرت مطرح شده است [۲]. ادوات FACTS نسل اول به دلیل سادگی ساختار و نحوه کنترل و توجیه اقتصادی گسترش نسبتاً خوبی پیدا کرده‌اند [۳]. اما نسل دوم این ادوات نظیر کنترل‌کننده یکپارچه توان (UPFC)^۲ که نقش مهمی در پایداری سیستم‌های قدرت دارند [۴]، با وجود قابلیت‌های منحصر و زیاد، به دلیل هزینه بالا و کنترل پیچیده در حد نمونه‌های تحقیقاتی باقی مانده‌اند. ایده به‌کارگیری و معرفی ترکیبی جدید از ادوات FACTS نسل اول به نحوی که با حفظ سادگی ساختار، نحوه کنترل و توجیه اقتصادی، قابلیت‌های ادوات FACTS پیشرفته را نیز دربرگیرنده تحولی در مفهوم FACTS به وجود آورده است که باعث کارآمدتر و مؤثرتر شدن بیشتر سامانه‌های انتقال گردیده است.

ساختارهای جدید ادوات FACTS ترکیبی شامل موارد زیر است: (الف) ترکیب PST و خازن سری سوئیچ شونده ترستوری (TSSC) که به آن کنترل‌کننده ترکیبی توان (HFC)^۳ گفته می‌شود [۵] و (ب) ترکیب PST و UPFC که به آن کنترل‌کننده بهینه یکپارچه توان (OUPFC)^۴ گفته می‌شود [۶]. با توجه به اینکه جابه‌جاگر فاز موجود در HFC در حالت دینامیکی عملکردی ندارد لذا می‌توان آن را با یک ترانسفورماتور جابه‌جاگر فاز چرخشی (RPST)^۵ جایگزین نمود. این عنصر جدید FACTS تحت عنوان کنترل‌کننده ترکیبی توان چرخشی (RHFC)^۶ در [۷] و [۸] معرفی شده است. در مرجع [۸] بهینه‌سازی چندهدفه به‌طور هم‌زمان برای RHFC با در نظر گرفتن سه تابع هدف (هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه) با استفاده از روش محدودیت ϵ جهت مجموعه بهینه پارتو استفاده شده است. همچنین با استفاده از تصمیم‌گیرنده فازی محدودده هر تابع هدف با استفاده از جدول payoff تعیین می‌شود. مدل‌سازی مناسب از مهم‌ترین گام‌ها جهت تحلیل رفتار سیستم است. بر اساس مدل سیستم، کنترل‌کننده‌ها و جبران‌سازهای مناسب طراحی می‌شوند تا سیستم کنترل‌شده مشخصه عملکرد مطلوب را به دست آورد.

برای حل مسائل جایابی بهینه و پخش بار بهینه روش‌های مختلفی در مقالات ارائه شده است. بعضی از این روش‌ها عبارت‌اند از: روش PSO [۹-۱۱]، الگوریتم ژنتیک^۷ [۱۲-۱۴]، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح و نرم‌افزار GAMS [۱۵]، تجزیه و تحلیل حساسیت [۱۶]،

[۱۷]، روش کاهش گرادیان^۸، روش نیوتن^۹، تجزیه P-Q^{۱۰}، نقطه داخلی^{۱۱} و برنامه‌نویسی تکاملی^{۱۲} که در [۱۸-۲۰] ارائه شده است. در مقایسه روش‌های مذکور، که اکثراً با الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار سروکار دارند، نرم‌افزار GAMS می‌تواند یک محیط برنامه‌نویسی جامع برای مدل‌سازی و حل بهینه سیستم‌ها باشد. یکی از امتیازات این نرم‌افزار سرعت پاسخ‌دهی آن به انواع سیستم‌ها است که بسیار چشم‌گیر است.

در مرجع [۱۵] با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح، تعداد، تنظیمات و محل قرارگیری جابه‌جاگرهای فاز کنترل‌شده با ترستور در سیستم‌های قدرت گسترده و بزرگ به صورت بهینه تعیین شده است.

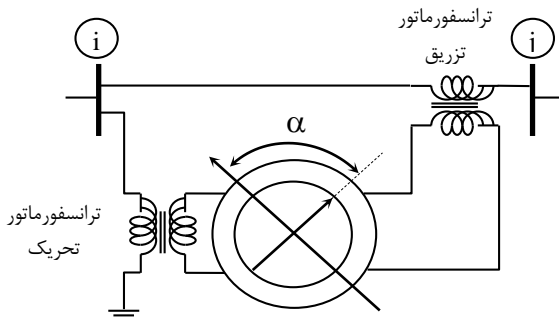
در مرجع [۱۶] با استفاده از جابه‌جاگر فاز پخش بار بهینه با هدف بهبود امنیت سیستم محقق شده است. روش ارائه شده در این مرجع، به گونه‌ای است که با پارامترهای کنترلی جابه‌جاگر فاز که ممکن است گسسته باشند، مشکلی پیدا نمی‌کند.

در مرجع [۲۱]، به نقش UPFC در کنترل انتقال توان پرداخته شده است. در این مرجع پس از معرفی مدل تزریق توان UPFC، به معرفی الگوریتمی جهت انجام پخش بار بهینه در حضور این عنصر پرداخته شده است. در مرجع [۲۲]، به معرفی IPFC و ارائه مدل پخش بار مناسب برای آن پرداخته شده است. در این مرجع به نقش این عنصر در کنترل انتقال توان در چند خط متفاوت اشاره شده است. در مرجع [۲۳]، بر مبنای مدل پخش بار ادوات FACTS، میزان و قابلیت کنترل انتقال توان توسط این ادوات در خطوط انتقال بررسی شده است. سپس بحث هماهنگی کنترل پخش بار توسط این ادوات به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شده است. در مرجع [۲۴]، راهکاری برای کنترل انتقال توان در شرایط ماندگار با استفاده از ادوات FACTS ارائه شده است. در این مرجع از مدل تزریق جریان برای این ادوات و حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است. قیدهای فیزیکی ادوات FACTS نیز در این مرجع لحاظ شده‌اند. در این مقاله، تمرکز اصلی در استخراج روابط ریاضی و برای اولین بار به دست آوردن نواحی عملکردی RHFC بر پایه مدل‌سازی استاتیکی است. همچنین، مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS به عنوان توابع هدف مسئله جایابی و پخش بار بهینه بر روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB شبیه‌سازی می‌شود. در حقیقت نرم‌افزار GAMS در نقش یک واسط عمل می‌کند که داده‌های شبکه را پس از آماده‌سازی توسط MATLAB دریافت نموده و به حل مسئله بهینه‌سازی می‌پردازد. بنابراین می‌توان گفت که به دست آوردن مقدار تابع هدف و محاسبه پارامترهای قابل تنظیم عنصر FACTS با نرم‌افزار MATLAB به راحتی امکان‌پذیر می‌شود. از نرم‌افزارهای مذکور، در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح با استفاده از

کنترل بیش‌تری روی انتقال توان اعمال کرد. رابطه بین ولتاژهای استاتور و روتور به صورت زیر است:

$$u_s = u_r e^{j\alpha} \quad (1)$$

که در آن $\alpha = \alpha_{elec} = p\alpha_{mech}$ و p تعداد قطب‌های ماشین است.



شکل ۲: جابه‌جاگر فاز چرخشی

۳-۱-۳ مدل حالت ماندگار RHFC

۳-۱-۱-۱ مدل ریاضی ترانسفورماتورها

۳-۱-۱-۱-۱ مدل ترانسفورماتور موازی

ترانسفورماتور موازی دارای اتصال ستاره-ستاره است. مدار معادل این ترانسفورماتور در شکل ۳ نشان داده شده است. اختلاف‌فاز ایجادشده بین اولیه و ثانویه این ترانسفورماتور است. سیم‌پیچ اولیه این ترانسفورماتور به خط و سیم‌پیچ ثانویه آن به روتورها وصل می‌شود. فرض کنید که تمام پارامترها به ثانویه ترانسفورماتور منتقل شده و جریان مغناطیس‌کنندگی هم ناچیز است. با توجه به رابطه آمپر-دور می‌توان نوشت:

$$I_E = T_{sh} e^{-j\gamma} I_R \quad (2)$$

با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتور

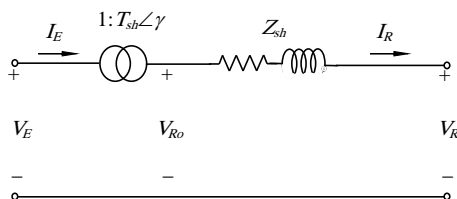
$$T_{sh} e^{j\gamma} = \frac{V_{Ro}}{V_E} \quad (3)$$

با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف در شکل ۳ داریم:

$$V_R = T_{sh} e^{j\gamma} V_E - Z_{sh} I_R \quad (4)$$

که در این روابط:

$$Z_{sh} = (R_{sh2} + T_{sh}^2 R_{sh1}) + j(X_{sh2} + T_{sh}^2 X_{sh1}) \quad (5)$$



شکل ۳: مدار معادل ترانسفورماتور موازی

حل‌کننده‌های MINOS و DICOPT جهت بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. از طرف دیگر، به‌منظور بیش‌تر مشخص شدن قابلیت‌های عملکردی RHFC، پروفیل ولتاژ فقط در حالت مینیمم کردن هزینه ژنراتورها، برای سیستم ۱۴ شینه و ۳۰ شینه آورده شده است.

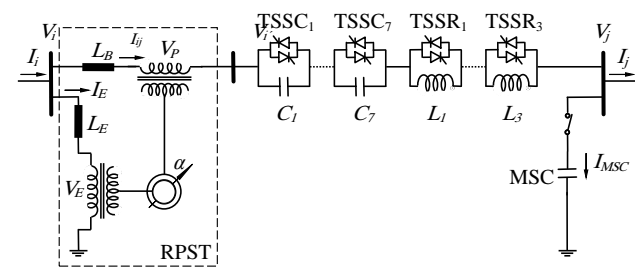
۲- اجزای عملکردی RHFC

RHFC از نظر ساختار، ترکیبی از کنترل‌کننده‌های توان موجود به شرح زیر است:

- الف- یک ترانسفورماتور جابه‌جاگر فاز چرخشی (RPST) که می‌تواند ولتاژی عمودی به صورت پیش‌فرض/پس‌کار تزریق نماید،
- ب- چندین ماژول اتصال خازن سری سوئیچ‌شونده تریستوری (TSSC) که یک راکتانس خازنی سری متغیر به صورت مراحل گسسته و برای تنظیم راکتانس سری خط اضافه می‌نماید،
- ج- چندین ماژول اتصال راکتور سری سوئیچ‌شونده تریستوری (TSSR) که یک راکتانس سلفی سری متغیر به صورت مراحل گسسته و به‌منظور جلوگیری از اضافه‌بار اضافه می‌نماید،
- د- یک خازن موازی با کلیدهای مکانیکی (MSC) برای جبران توان راکتیو.

MSC به علت ثابت‌زمانی زیاد فقط بر توان عبوری حالت ماندگار مؤثر است، در صورتی‌که ماژول‌های TSSC و TSSR و همچنین RPST می‌توانند هر دو توان عبوری حالت ماندگار و دینامیکی را کنترل نمایند [۲۵].

ساختار RHFC در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار RHFC

RPST بخش اصلی RHFC است که به نظر می‌رسد پاسخ دینامیکی RHFC را بهبود می‌دهد و همچنین ناحیه کنترلی آن را گسترش می‌دهد، چراکه امکان کنترل پیوسته فاز ولتاژ تزریق شده فراهم می‌شود. موارد گفته‌شده از ویژگی‌های برجسته RHFC به شمار می‌روند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، RPST مانند ماشین القایی، دارای روتور و استاتور با سیم‌پیچ‌های سه‌فاز، که نسبت به هم درجه جابه‌جایی دارند، است. نکته قابل توجه این است که هرچه تعداد قطب‌های ماشین بیش‌تر باشد، با چرخش کم‌تر روتور می‌توان

۳-۱-۲- مدل ترانسفورماتور سری

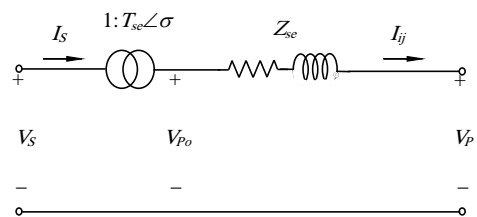
با توجه به شکل ۴ که مدار معادل تک فاز ترانسفورماتور سری را نشان می دهد، می توان روابط زیر را استخراج کرد:

$$I_s = T_{se} e^{-j\sigma} I_{ij} \quad (6)$$

$$T_{se} e^{j\sigma} = \frac{V_{po}}{V_s} \quad (7)$$

$$V_p = T_{se} e^{j\sigma} V_s - Z_{se} I_{ij} \quad (8)$$

$$Z_{se} = (R_{se1} + T_{se}^2 R_{se2}) + j(X_{se1} + T_{se}^2 X_{se2}) \quad (9)$$



شکل ۴: مدار معادل ترانسفورماتور سری

۳-۲- مدل ریاضی RHFC

با نوشتن معادلات مداری در شکل ۱ و ساده سازی روابط و ترکیب آن ها با معادلات ترانسفورماتورهای تحریک و تزریق و همچنین روابط بین استاتور و روتور، می توان به روابط زیر دست یافت:

$$T_n e^{j\alpha} = \frac{V_s}{V_r} \quad (10)$$

$$I_r = I_s e^{-j\sigma} T_n \quad (11)$$

$$V_s = T_n e^{j\alpha} V_r - Z_n I_s \quad (12)$$

با جاگذاری I_s از رابطه (۶) در معادلات (۱۱) و (۲) جریان ترانسفورماتور تحریک از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_E = k e^{-j\beta} I_{ij} \quad (13)$$

که در آن

$$k = T_{st} T_n T_{se} \quad (14)$$

$$\beta = \gamma + \sigma + \alpha \quad (15)$$

ولتاژ سری تزریق شده RPST را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$V_p = k e^{j\beta} V_i - Z_{se} I_{ij} - \frac{Z_{sh} k^2}{T_{sh}^2} I_{ij} - Z_n T_{se}^2 I_{ij} \quad (16)$$

با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف در شکل ۱ داریم:

$$V_i = -V_p + V_{i'} \quad (17)$$

که در آن:

$$V_{i'} = j(K_L X_L - K_C X_C) I_{ij} + V_j \quad (18)$$

طبق معادله (۱۸) ولتاژ V_i' به دست می آید که ضرایب k_L و k_C مقدار X_L و X_C در سرویس را تعیین می کنند (از تلفات اهمی صرف نظر شده است). جریان خط با جاگذاری V_i' از معادله (۱۸) و V_p از معادله (۱۶) به صورت زیر به دست می آید:

$$I_{ij} = \frac{(1 + k e^{j\beta}) V_i}{j X_{ij}} - \frac{V_j}{j X_{ij}} \quad (19)$$

که در آن $X_{ij} = X_{se} + \frac{X_{sh} k^2}{T_{sh}^2} + X_{rt} T_{se}^2 + K_L X_L - K_C X_C + X_{line}$ است. در شینه i داریم:

$$I_i = I_E + I_{ij} \quad (20)$$

با جاگذاری I_E از معادله (۱۳) و I_{ij} از معادله (۱۹) در معادله (۲۰) می توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$I_i = (1 + k e^{-j\beta})(1 + k e^{j\beta}) Y_{ij} V_i - (1 + k e^{-j\beta}) Y_{ij} V_j \quad (21)$$

که در آن $Y_{ij} = \frac{1}{j X_{ij}}$ است. در شینه j نیز داریم:

$$I_j = I_{ij} - I_{MSC} \quad (22)$$

که در آن I_{MSC} جریان خازنی MSC است.

$$I_{MSC} = \frac{V_j}{-j X_{MSC}} \quad (23)$$

جریان I_j با جایگذاری I_{ij} و I_{MSC} از معادلات (۲۲) و (۱۹) در معادله (۲۱) به دست می آید.

$$I_j = Y_{ij} (1 + k e^{j\beta}) V_i - Y_{ij} V_j + Y_{MSC} V_j \quad (24)$$

از معادلات (۲۰) و (۲۳) پارامترهای دوقطبی یک RHFC مطابق معادله زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + k e^{-j\beta})(1 + k e^{j\beta}) Y_{ij} & -(1 + k e^{-j\beta}) Y_{ij} \\ (1 + k e^{j\beta}) Y_{ij} & -Y_{ij} + Y_{MSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (25)$$

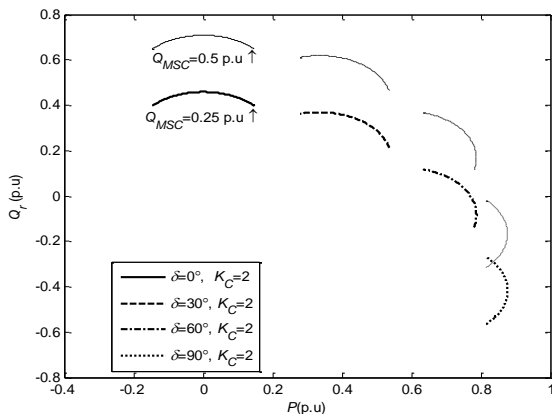
زاویه شیفت فاز در معادلات توان و همچنین در مشتقات جزئی ماتریس ژاکوبین ظاهر می شود. مشتقات جزئی دامنه ها و زوایای فاز نسبت به دامنه و زوایای ولتاژ کوچک هستند. با این تقریب زاویه جابه جاگر فاز چرخشی در Y_{bus} ظاهر نشده و بنابراین تقارن و سازگاری ماتریس ادمیتانس شبکه نیز حفظ می شود.

۴- نمودار نواحی عملکرد RHFC

با استفاده از مدل حالت ماندگار به دست آمده و مدل تزریق توان RHFC با در نظر گرفتن قید توازن توان در مرجع $[V]$ ، قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو RHFC در صفحه $\{Q, P\}$ بررسی شده است. مشخصات مربوط به RHFC در قسمت پیوست آمده است.

شکل ۵ ناحیه عملکردی RHFC را در زوایای انتقال (δ) ، ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و به آرامی نسبت تبدیل $K_C=2$ ، $K_C=6$ و تغییر زاویه فاز RPST (σ) بین ۴۵- و ۴۵+ درجه نشان می دهد. به طور واضح در

ادوات FACTS مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه روابط مربوط به توابع هدف تشریح شده است.



شکل ۶: مقادیر قابل حصول P و Qr با RHFC با در نظر گرفتن QMSC=0.5 pu و QMSC=0.25 pu

۵-۱- تابع هزینه سوخت ژنراتورها

اولین تابع هدف حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها است که رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۸-۷]:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{NG} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (\$/h) \quad (26)$$

که در آن، NG تعداد ژنراتورها، P_{Gi} توان اکتیو خروجی ژنراتور نام بر حسب MW، a_i، b_i، c_i ضرایب هزینه سوخت ژنراتور نام است.

۵-۲- تابع تلفات توان اکتیو شبکه

دومین تابع هدف حداقل نمودن مجموع تلفات شبکه با رابطه زیر است [۸-۷]:

$$F_2 = P_{Loss}(x, u) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\alpha_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (27)$$

که در آن، V_i و V_j اندازه ولتاژ شینه نام و زام، Y_{ij} مقدار دامنه عنصر واقع در سطر نام و ستون نام ماتریس ادمیتانس، θ_i و θ_j زاویه ولتاژ شینه نام و زام، α_{ij} مقدار زاویه عنصر واقع در سطر نام و ستون نام ماتریس ادمیتانس است.

۵-۳- شاخص بارپذیری شبکه

سومین تابع هدف حداکثر نمودن بارپذیری در شبکه و یا به عبارتی دیگر استفاده از ظرفیت خالی خطوط به منظور افزایش انتقال توان است و به صورت زیر بیان می‌شود [۸-۷]:

$$F_3 = \rho(x, u) \quad (28)$$

با توجه به این که:

$$P_G - \rho P_D = f_p(x, u) \quad (29)$$

$$Q_G - \rho Q_D = f_q(x, u)$$

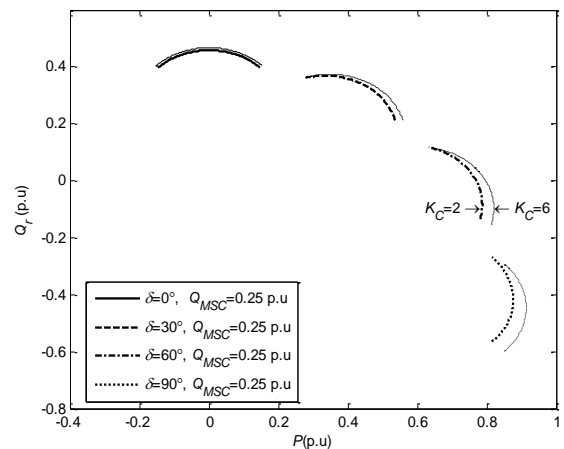
که در آن P_G و Q_G: بردارهای توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها، P_D و Q_D: بردارهای توان اکتیو و راکتیو بار شینه‌ها، f_p(x,u) و f_q(x,u) بردارهای معادلات پخش بار توان اکتیو و راکتیو است.

شکل ۴ مشاهده می‌گردد که ناحیه قابل کنترل توان اکتیو با افزایش زاویه انتقال محدودتر و با افزایش مقدار K_c بیش‌تر می‌شود.

در شکل ۶ جهت برجسته کردن اثر بانک‌های خازنی در RHFC ناحیه عملکردی RHFC در زوایای انتقال ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و به ازای Q_{MSC}=0.25 pu و Q_{MSC}=0.5 pu در K_c=2 نشان داده شده است. در این نواحی، توان راکتیو افزایش می‌یابد. قابل توجه است که طبق شکل‌های ۵ و ۶ نواحی عملکرد RHFC با مقادیر K_c، K_L، Q_{MSC} و δ کنترل می‌شود. نواحی عملکرد RHFC با در نظر گرفتن مقادیر طبق جدول ۱ به دست آمده است:

جدول ۱: مقادیر در نظر گرفته شده برای نواحی عملکرد

RHFC	
مقادیر	پارامترها
۱	V _i =V _j
۲۵/۴۰۰	T _{sh}
۲۵/۲۵	T _r
۱۲۵/۲۵	T _{se}
۱	K _L
۰/۰۲ p.u	X _{sh}
۰/۰۲ p.u	X _{se}
۰/۰۴	X _{rt}
۰/۰۰۷۶ p.u	X _L
۰/۰۱۵۲ p.u	X _C



شکل ۵: مقادیر قابل حصول P و Qr با RHFC با در نظر گرفتن K_c=2 و K_c=6

در مدل پیشنهادی تنها توان اکتیو و راکتیو شینه‌های نصب تجهیزات FACTS تغییر می‌کنند و تقارن در ادمیتانس شبکه حفظ می‌شود. نواحی عملکردی RHFC به دست آمده با اصول عملکرد تشریح شده مطابقت دارد.

۵-۴- توابع هدف و قیود بهینه‌سازی

در این مقاله برای OPF، چهار تابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات توان اکتیو شبکه، بارپذیری شبکه و هزینه نصب و نگهداری

۴-۵- هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS

چهارمین تابع هدف حداقل نمودن هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS است که می‌توان آن را به صورت یک رابطه ریاضی بیان نمود:

$$F_4 = \frac{C_{FACTS}}{8760 \times 5} \quad (\$/h) \quad (30)$$

که C_{FACTS} هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS برحسب دلار امریکا است. بر اساس پایگاه اطلاعاتی شرکت‌های زمینس و ABB توابع هزینه UPFC و RHFC را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲۶-۲۸]:

$$C_{UPFC} = (0.0003S_{UPFC}^2 - 0.2691S_{UPFC} + 188.22) \times S_{UPFC} \times 1000 \quad (31)$$

$$C_{RHFC} = (0.00012S_{RHFC}^2 - 0.10764S_{RHFC} + 75.288) \times S_{RHFC} \times 1000 \quad (32)$$

که S_{FACTS} توان ادوات FACTS برحسب MVA است. در این مقاله یک دوره ۵ ساله برای سرمایه‌گذاری ادوات FACTS در نظر گرفته شده است.

۶- قیود

۶-۱- قیود مساوی

قیود مساوی معادلات پخش بار برای توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di} - f_{Pi}(x, u) &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - f_{Qi}(x, u) &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

که در آن P_{Gi} و Q_{Gi} توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور نام i ، P_{Di} و Q_{Di} توان‌های اکتیو و راکتیو بار در شینه نام i ، f_{Pi} و f_{Qi} معادلات پخش‌پذیری اکتیو و راکتیو در شینه نام i می‌باشند.

۶-۲- قیود نامساوی

قیود نامساوی شامل قیود تولید، امنیت و قیود ادوات FACTS است که در ذیل شرح داده می‌شوند:

• **قیود تولید:** قیود تولید شامل محدودیت روی ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها است.

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (34)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (35)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (36)$$

• **قیود امنیت:** این قیود شامل محدودیت روی ولتاژ شینه‌های بار و بارگذاری خطوط انتقال است.

$$V_{Li}^{\min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{\max}, \quad i = 1, \dots, Nd \quad (37)$$

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{\max}, \quad i = 1, \dots, Nl \quad (38)$$

که Nl و Nd به ترتیب تعداد شینه‌های بار و خطوط انتقال است.

• **قیود ادوات FACTS:** این قیود شامل محدودیت روی توان و تنظیمات ادوات FACTS است:

$$\left. \begin{aligned} r^{\min} \leq r \leq r^{\max} \\ \gamma^{\min} \leq \gamma \leq \gamma^{\max} \end{aligned} \right\} \quad \text{for UPFC} \quad (39)$$

$$\left. \begin{aligned} k^{\min} \leq k \leq k^{\max} \\ -\pi \leq \beta \leq \pi \\ 0 \leq K_c \leq K_c^{\max} \\ 0 \leq K_L \leq K_L^{\max} \\ 0 \leq K_m \leq K_m^{\max} \end{aligned} \right\} \quad \text{for RHFC} \quad (40)$$

۷- روش پیشنهادی و پیاده‌سازی آن

مسئله OPF و جایابی بهینه با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و Matlab انجام می‌شود. در روش پیشنهادی یک معیار توقف برای تعداد بهینه ادوات FACTS در نظر گرفته شده است. این معیار در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول تابع هدف بدون عنصر FACTS محاسبه می‌شود. در مرحله دوم توابع هدف که همان روابط (۲۶)، (۲۷)، (۲۸) و (۳۰) هستند، با نخستین عنصر FACTS محاسبه می‌گردند. اختلاف مابین دو مرحله میزان اثرپذیری نامیده می‌شود. روند بهینه‌سازی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف مابین دو تابع هدف متوالی ضربه در ضریب اثرپذیری کوچک‌تر از میزان اثرپذیری گردد.

الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه‌های استاندارد ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE پیاده‌سازی و عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله بهینه‌سازی در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح است. در این مقاله، مسائل بهینه‌سازی NLP و MINLP به ترتیب با استفاده از حل‌کننده‌های MINOS و DICOPT حل می‌گردد [۲۹].

۸- نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۱۴ شینه IEEE

به منظور مطالعه تأثیر RHFC از لحاظ مکان و تنظیمات آن روی شاخص‌های بهره‌برداری سیستم قدرت، عملکرد RHFC روی شبکه ۱۴ شینه IEEE بررسی و با UPFC مقایسه می‌شود. مشخصات مربوط به UPFC در قسمت پیوست آمده است. نتایج بهینه‌سازی برای دو حالت، یک‌بار در حالت بدون هزینه نصب و نگهداری و بار دیگر با در نظر گرفتن هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. به عنوان نمونه، در شکل ۷ پروفیل ولتاژ RHFC به منظور بیش‌تر مشخص شدن قابلیت‌های عملکردی آن به ازای تابع هدف در حالت بهینه‌سازی هزینه سوخت کل ژنراتورها برای سیستم ۱۴ شینه آورده شده است. با مقایسه نتایج جدول ۲ مشاهده می‌گردد که به منظور حداقل نمودن هزینه سوخت کل ژنراتورها عناصر RHFC و UPFC عملکردی یکسان دارند ولی با توجه به تلفات UPFC و تولید هماهنگ، استفاده از RHFC توجه فنی دارد. در ضمن با توجه به اینکه RHFC اندازه کم‌تری نسبت به UPFC دارد، هزینه نصب آن به مراتب کمتر از UPFC است. در راستای کاهش تلفات شبکه، توانایی UPFC در کاهش تلفات اکتیو و راکتیو بهتر از RHFC است. قابل‌ذکر

است که تلفات داخلی UPFC در نظر گرفته نشده است. همچنین به منظور حداکثر نمودن بارپذیری شبکه، عنصر UPFC بهترین عملکرد را نسبت به RHFC دارد، در حالی که اندازه RHFC به طور قابل توجهی کاهش یافته است و به نظر می رسد که استفاده از RHFC در سیستم های قدرت توجیه اقتصادی بیش تری دارد.

جدول ۲: نتایج شبیه سازی در شبکه ۱۴ شینه IEEE و بدون بهینه سازی هزینه FACTS

UPFC	RHFC	بدون FACTS	تابع هدف
۱۷۲۱۸/۷۱	۱۷۲۱۸/۷۱	۱۷۲۷۸/۸۰	هزینه ژنراتورها (\$/h)
۰/۹۰۲	۱/۰۹۰	۱/۷۱۲	تلفات توان اکتیو (MW)
۱	۱	۱	شاخص بارپذیری
۱۱/۳۴۲	۱۱/۶۹۶	۱۴/۲۸۱	تلفات توان راکتیو (MVar)
۲۳۷/۰۴	۱۰۸/۰۸	-	هزینه FACTS (\$/h)
۵۹/۹۶	۲۷/۲۲	-	توان FACTS (MVA)
۵ - ۱	۵ - ۱	-	مکان (شینه - شینه)
$r=0/135$ $\gamma=77/102$	$K_C=4$ $k=0/0504$ $K_m=1$ $K_L=2$ $\beta=102/58$	-	تنظیمات FACTS
۰/۷۵۹	۰/۸۰۴	۱/۱۲۸	تلفات توان اکتیو (MW)
۱۸۳۷۹/۸۸	۱۸۳۱۰/۷۱	۱۸۱۸۶/۶۱	هزینه ژنراتورها (\$/h)
۱	۱	۱	شاخص بارپذیری
۱۰/۵۱۵	۱۱/۶۳۱	۱۲/۲۶۸	تلفات توان راکتیو (MVar)
۲۲۴/۹۵	۱۰۱/۵۰	-	هزینه FACTS (\$/h)
۵۶/۶۵	۲۷/۷۳	-	توان FACTS (MVA)
۴ - ۲	۱۳ - ۶	-	مکان (شینه - شینه)
$r=0/105$ $\gamma=72/774$	$K_C=0$ $k=0/0358$ $K_m=0$ $K_L=3$ $\beta=69/15$	-	تنظیمات FACTS
۱/۵۶۶	۱/۵۵۹	۱/۵۵۷	شاخص بارپذیری
۳۰۷۰۰/۱۰	۳۰۷۰۰/۱۰	۳۰۷۰۰/۱۰	هزینه ژنراتورها (\$/h)
۴/۲۴۳	۶/۱۰۱	۶/۸۶۲	تلفات توان اکتیو (MW)
۲۱/۰۹۸	۲۹/۰۹۸	۳۰/۸۲۳	تلفات توان راکتیو (MVar)
۳۵۳/۴۷	۱۵۲/۴۱	-	هزینه FACTS (\$/h)
۹۳/۴۴	۲۴/۹۱	-	توان FACTS (MVA)
۳ - ۲	۱۳ - ۶	-	مکان (شینه - شینه)
$r=0/184$ $\gamma=88/496$	$K_C=7$ $k=0/0169$ $K_m=1$ $K_L=0$ $\beta=136/16$	-	تنظیمات FACTS

بارپذیری شبکه، UPFC عملکرد بهتری نسبت به RHFC دارد و در هزینه سوخت ژنراتورها عناصر RHFC و UPFC عملکردی یکسان دارند، در حالی که در سایر موارد عملکرد بهتر RHFC نسبت به UPFC مشاهده می گردد. طبق نتایج جداول ۲ و ۳، RHFC با داشتن عملکردی نزدیک به UPFC از نظر فنی، با صرف هزینه کم تر نسبت به UPFC برتری خود را نشان می دهد.

طبق جدول ۳، در حالت با در نظر گرفتن بهینه سازی هزینه ادوات FACTS و به منظور حداقل نمودن توابع هدف هزینه سوخت کل ژنراتورها و تلفات شبکه، عنصر RHFC نسبت به UPFC بهترین عملکرد را دارد، اگر چه UPFC در تابع هدف تلفات شبکه، در کاهش تلفات اکتیو بهتر از RHFC عمل کرده است. همچنین به منظور افزایش

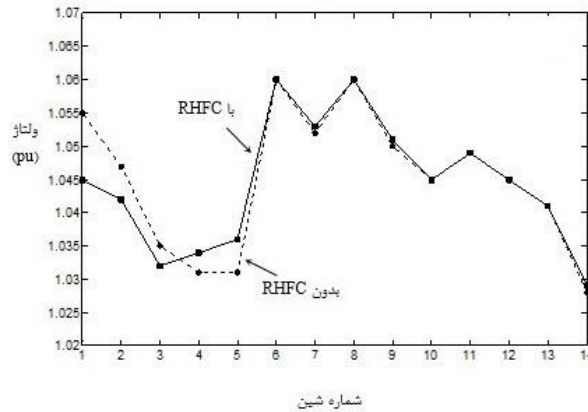
جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۱۴ شینه IEEE و با بهینه‌سازی هزینه FACTS

تابع هدف	بدون FACTS	RHFC	UPFC
F ₁	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۱۷۲۳۱/۰۸	۱۷۲۳۴/۱۷
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱/۱۰۰۸	۱/۱۰۷۵
	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۱۴/۲۸۱	۱۲/۱۶۰۹
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۱۲۳/۴۹
	توان FACTS (MVA)	-	۲۹/۹۸
	مکان (شینه - شینه)	-	۵ - ۱
	تنظیمات FACTS	-	$r=0.0674$ $\gamma=75/715$
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱/۱۲۸	۰/۷۸۳
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۱۸۱۸۶/۶۱	۱۸۱۱۰/۱۰
F ₂	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۱۲/۲۶۸	۱۱/۶۳۴
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۸۹/۸۶
	توان FACTS (MVA)	-	۲۱/۵۶
	مکان (شینه - شینه)	-	۱۳ - ۶
	تنظیمات FACTS	-	$r=0.0326$ $\gamma=68/833$
	شاخص بارپذیری	۱/۵۵۷	۱/۵۵۵
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۳۰۷۰۰/۱۰	۳۰۷۰۰/۱۰
	تلفات توان اکتیو (MW)	۶/۸۶۲	۴/۱۷۲
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۳۰/۸۲۳	۲۹/۷۹۴
F ₃	هزینه FACTS (\$/h)	-	۱۱۷/۸۳
	توان FACTS (MVA)	-	۲۸/۵۵
	تنظیمات FACTS	-	$r=0.0143$ $\gamma=-85/562$
	توان FACTS (MVA)	-	۲۲/۳۷
	تنظیمات FACTS	-	$K_C=7$ $k=0.020$ $K_m=0$ $K_L=0$ $\beta=129/06$

۹- نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۳۰ شینه IEEE

با مقایسه نتایج جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد که در هر دو حالت به‌منظور حداقل نمودن هزینه سوخت کل ژنراتورها و همچنین کاهش تلفات شبکه، عنصر UPFC عملکردی بهتر از RHFC دارد، درحالی‌که سائز RHFC به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین با توجه به تلفات UPFC و تولید هارمونیک، استفاده از RHFC توجه فنی نیز دارد. در حالت بهینه‌سازی به‌منظور حداکثر نمودن بارپذیری شبکه، عملکرد بهتر RHFC نسبت به UPFC در هر دو حالت مشاهده می‌شود.

به‌منظور ارزیابی اثر ادوات FACTS بر روی شبکه‌های بزرگ‌تر با در نظر گرفتن متغیرهای کنترل و وابسته و پارامترهای کنترل از شبکه ۳۰ شینه IEEE استفاده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای دو حالت، یک‌بار در حالت بدون هزینه نصب و نگهداری و بار دیگر با در نظر گرفتن هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همچنین در شکل ۸ پروفیل ولتاژ RHFC در حالت بهینه‌سازی هزینه سوخت ژنراتورها، برای سیستم ۳۰ شینه استاندارد IEEE نشان داده می‌شود.



شکل ۷: پروفیل ولتاژ در شبکه ۱۴ شینه با و بدون حضور RHFC

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۳۰ شینه IEEE و بدون بهینه‌سازی هزینه FACTS

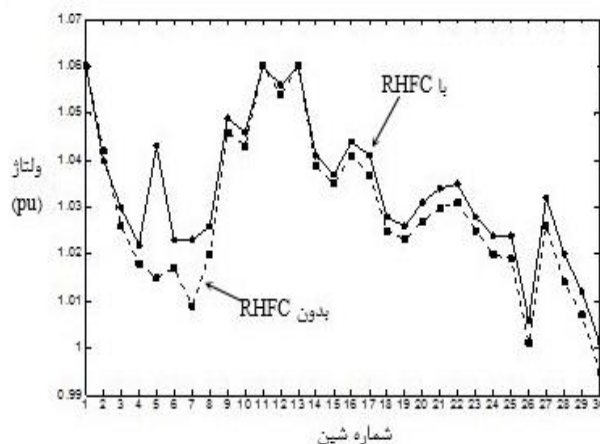
تابع هدف	بدون FACTS	RHFC	UPFC
F ₁	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۸۰۱/۸۴۶	۷۹۰/۸۳
	تلفات توان اکتیو (MW)	۹/۴۴۷	۶/۳۶۲
	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۳۷/۷۸۹	۳۷/۶۱۹۷
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۱۵۲/۱۸
	توان FACTS (MVA)	-	۱۱/۲۲۱
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۴ - ۲۲
	تنظیمات FACTS	-	$K_c=7, k=0.2039$
		-	$K_m=0, K_l=0, \beta=42/473$
		-	$r=0.204, \gamma=85/175$
F ₂	تلفات توان اکتیو (MW)	۳/۲۹۱	۲/۰۳۱
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۹۶۸/۱۱۸	۹۶۵/۱۱۷
	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۱۶/۲۴۵	۱۱/۶۶۸
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۹۸/۰۸
	توان FACTS (MVA)	-	۱۳/۸۴۸
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۰ - ۱۰
	تنظیمات FACTS	-	$K_c=0, k=0.305$
		-	$K_m=0, K_l=3, \beta=60/779$
		-	$r=0.137, \gamma=66/120$
F ₃	شاخص بارپذیری	۱/۴۰۲	۱/۴۳۷
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۱۳۱۹/۴۰۲	۱۳۵۵/۳۱
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱۲/۵۳۲	۱۳/۴۱۰
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۵۱/۸۴۶	۵۶/۲۴۷
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۱۴۹/۴۳
	توان FACTS (MVA)	-	۱۱/۶۴۲
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۴ - ۲۵
	تنظیمات FACTS	-	$K_c=0, k=0.2617$
		-	$K_m=1, K_l=3, \beta=145/87$
		-	$r=0.056, \gamma=97/875$

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۳۰ شینه IEEE و با بهینه‌سازی هزینه FACTS

تابع هدف	بدون FACTS	RHFC	UPFC
F ₁	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۸۰۲/۲۵	۷۹۳/۵۸
	تلفات توان اکتیو (MW)	۹/۴۴۷	۷/۱۰۲۵
	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۳۷/۷۸۹	۳۸/۶۹۹
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۱۰۰/۱۴
	توان FACTS (MVA)	-	۶/۰۱
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۴ - ۲۲
	تنظیمات FACTS	-	$K_C=3 \quad k=0.0203$ $K_m=0 \quad K_L=0 \quad \beta=40/409$
	تلفات توان اکتیو (MW)	۳/۲۹۱	۳/۱۸۸
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۹۶۸/۱۱۸	۹۶۷/۸۲
F ₂	شاخص بارپذیری	۱	۱
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۱۶/۲۴۵	۱۶/۴۹۴
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۷۸/۰۸
	توان FACTS (MVA)	-	۸/۰۱
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۰ - ۱۰
	تنظیمات FACTS	-	$K_C=1 \quad k=0.0298$ $K_m=0 \quad K_L=0 \quad \beta=60/019$
	شاخص بارپذیری	۱/۴۰۲	۱/۴۷۹
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۱۳۱۹/۴۰۲	۱۴۰۹/۹۲
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱۲/۵۳۲	۱۶/۰۰۶
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۵۱/۸۴۶	۶۹/۹۱۲
F ₃	هزینه FACTS (\$/h)	-	۸۴/۳۴
	توان FACTS (MVA)	-	۶/۱۹
	مکان (شینه - شینه)	-	۲۴ - ۲۵
	تنظیمات FACTS	-	$K_C=2 \quad k=0.01987$ $K_m=1 \quad K_L=0 \quad \beta=138/84$
	شاخص بارپذیری	۱/۴۰۲	۱/۴۷۹
	هزینه ژنراتورها (\$/h)	۱۳۱۹/۴۰۲	۱۴۰۹/۹۲
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱۲/۵۳۲	۱۶/۰۰۶
	تلفات توان راکتیو (MVar)	۵۱/۸۴۶	۶۹/۹۱۲
	هزینه FACTS (\$/h)	-	۸۴/۳۴
	توان FACTS (MVA)	-	۶/۱۹

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، RHFC به‌عنوان یک عنصر جدید FACTS که ترکیبی از کنترل‌کننده‌های توان موجود از جمله جابه‌جاگر فاز چرخشی، یک خازن موازی با کلیدهای مکانیکی معمولی، چندین خازن و راکتور سری سوئیچ‌شونده ترستوری است، مدل‌سازی شده است. همچنین نواحی عملکردی RHFC بر اساس مدل استاتیکی استخراج می‌شود که ضمن نشان دادن قابلیت کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو RHFC، درستی فلسفه وجودی RHFC را اثبات می‌کند. مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS به‌عنوان توابع هدف مسئله جایابی و پخش بار بهینه بر روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۸: پروفیل ولتاژ در شبکه ۳۰ شینه با و بدون حضور RHFC

and Computer Engineering (AECE), vol. 11, no.2, pp. 79-86, 2011.

- [۴] زهیر هوشی، مهرداد طرفدار حق و مهران صباحی، «جبران ساز خطبه خط، نسل جدیدی از ادوات FACTS»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۶۶-۵۷، ۱۳۹۳.
- [5] A. Lashkarara, A. Kazemi, S. A. Nabavi Niaki., "Optimal location of hybrid flow controller considering modified steady-state model," *Applied Energy*, vol. 88, no.4, pp. 1578-1585, 2011.
- [6] A. Lashkar Ara, A. Kazemi, S. A. Nabavi Niaki, "Modelling of optimal unified power flow controller (OUPFC) for optimal steady-state performance of power systems," *Energy Conversion and Management (ECM)*, vol. 52, no. 2, pp. 1325-1333, 2011.
- [7] R. Rezaeipour, A. Kazemi, "Optimal placement of rotary hybrid flow controller (RHFC) considering operational management of power systems," *International Review of Electrical Engineering (IREEE)*, vol. 6, no. 1, 2011.
- [8] A. Kazemi, R. Rezaeipour, A. Lashkarara, "Optimal location of rotary hybrid flow controller (RHFC) through multi-objective mathematical programming," *Sharif University of Technology (Scientia Iranica)*, vol. 19, no. 6, pp.1771-1779, 2012.
- [9] Y. delValle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171-195, 2008.
- [10] N. Mo, Z. Y. Zou, K. W. Chan and T. Y. G. Pong, "Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimisation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 476-483, 2007.
- [11] P. E. Oñate Yumbla, J. M. Ramirez, C. A. Coello Coello, "Optimal power flow subject to security constraints solved with a particle swarm optimizer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 33-40, 2008.
- [12] L. Ippolito, P. Siano, "Selection of optimal number and location of thyristor-controlled phase shifters using genetic based algorithms," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 5, pp. 630-637, 2004.
- [13] P. Paterni, S. Vitet, M. Bena, A. Yokoyama, "Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 37-42, 1999.
- [14] S. Gerbex, R. Cherkaoui, A. J. Germond, "Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 537-544, 2001.
- [15] F. G. M. Lima, F. D. Galiana, I. Kockar, J. Munoz, "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1029-1034, 2003.
- [16] J. A. Momoh, J. Z. Zhu, G. D. Boswell, S. Hoffman, "Power system security enhancement by OPF with phase shifter," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 287-293, 2001.
- [17] S. An, J. Condren, T. W. Gedra, "An ideal transformer UPFC model, OPF first-order sensitivities, and application to screening for optimal UPFC locations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 68-75, 2007.
- [18] M. Huneault, F. D. Galiana, "A survey of the optimal power flow literature," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 70-762, 1991.

در این مقاله، استفاده از نرم افزارهای مذکور، در قالب برنامه ریزی غیرخطی (NLP) و برنامه ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح (MINLP) با استفاده از حل کننده های MINOS و DICOPT انجام می گیرد.

در ضمن، به منظور بیش تر مشخص شدن قابلیت های عملکردی RHFC پروفیل ولتاژ آن، به ازای بهینه سازی تابع هدف فقط در یک حالت بهینه سازی هزینه سوخت ژنراتورها، برای سیستم ۱۴ شینه و ۳۰ شینه آورده شده است. همچنین، به منظور بررسی قابلیت های عملکردی RHFC، نتایج شبیه سازی با UPFC، به عنوان بهترین عنصر شاخص ادوات FACTS، از لحاظ فنی و اقتصادی مقایسه می گردد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که می توان RHFC را مناسب ترین عنصر جهت تأمین بار و انرژی در اقتصادی ترین حالت ممکن در بهره برداری سیستم های قدرت در نظر گرفت.

تقدیر و تشکر

این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز در قالب یک طرح تحقیقاتی حمایت شده است که بدین وسیله از کلیه مسئولان و کارکنان حوزه معاونت پژوهشی سپاسگزاری می شود.

پیوست ها

پارامترهای RHFC

$T_{rt}=25/25$	$X_{rt}=0/0.4 \text{ p.u}$	$X_{se}=0/0.07 \text{ p.u.}$
$T_{sh}=25/V_{BUS}$	$X_{sh}=0/0.1 \text{ p.u}$	$Y_{MSC}=0/25 \text{ p.u.}$
$X_C=0/0.076 \text{ p.u}$	$X_L=0/0.38 \text{ p.u.}$	
$0 < k_c < 7$	$0 < k_l < 3$	$0 < k_m < 2$

پارامترهای UPFC

$0 < \gamma < 1$	$X_B=0/0.07 \text{ p.u.}$	$X_E=0/0.1 \text{ p.u.}$
$-\pi \leq \gamma \leq \pi$	$S_{base}=100 \text{ MVA}$	

مراجع

- [1] M. R. Iravani, P. L. Dandeno, D. Maratukulam, K. H. Nguyen and D. Zhu, "Applications of static phase shifters in power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, pp. 1600-1608, no. 3, 1994.
- [۲] سعید ابادری و امید مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۱۱-۱، ۱۳۹۵.
- [3] A. M. Haddadi, A. Kazemi, "Optimal power flow control by rotary power flow controller," *Advances in Electrical*

- [25] R. Rezaeipour, A. Kazemi, M. Tayebi, "Operational comparison of a new FACTS controller (RHFC) with other FACTS devices considering modified steady-state model," *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 88, no. 7A, pp. 54-58, 2012.
- [26] M. Saravanan, S. M. R. Slochanal, P. Venkatesh, J. P. S. Abraham, "Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 3-4, pp. 276-283, 2007.
- [27] L. J. Cai, I. Erlich, "Optimal choice and allocation of FACTS devices using genetic algorithm," *Proceedings on Twelfth Intelligent Systems Application to Power Systems Conference*, pp. 1-6, 2003.
- [28] CIGRE International Seminar & ABB Utilities, *A New Innovation within FACTS Family: Dynamic Flow Controller (DynaFlow)*, ptc/ 27-29, November 2005, http://www.cigre.cl/sem_inter_cigre_nov_2005/presentaciones/ABB_completo.pdf.
- [29] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modeling system to power system optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, 1999.
- [19] J. A. Momoh, M. E. EL-Hawary, R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993, Part I: Nonlinear and quadratic programming approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 96-104, 1999.
- [20] J. A. Momoh, M. E. EL-Hawary, R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993, Part II: Newton, linear programming and interior point methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no.1, pp. 11-104, 1999.
- [21] W. Shao, V. Vittal, "LP-Based OPF for corrective FACTS control to relieve overloads and voltage violations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, 2006.
- [22] J. Zhang, A. Yokoyama, "Optimal power flow control for congestion management by interline power flow controller (IPFC)," *International Conference on Power System Technology*, 2006.
- [23] N. Li, Y. Xu, H. Chcn, "FACTS-based power flow control in interconnected power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, 2000.
- [24] Y. Xiao, Y. H. Song, Y. Z. Sun, "Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, 2002.

زیر نویس ها

¹Flexible AC Transmission Systems

²Unified Power Flow Controller

³Hybrid Flow Controller

⁴Optimal Unified Power Flow Controller

⁵Rotarh Phase Shifting Transformer

⁶Rotary Hybrid Flow Controller

⁷Genetic Algorithm (GA)

⁸Reduced Gradient

⁹Newton Method

¹⁰P-Q Decomposition

¹¹Interior Point Method

¹²Evolutionary Programming