

## تأثیر توسعه شبکه بر مسئله جایابی ترانسفورماتور جابجا کننده فاز در شبکه ایران

گئورگ قره تپیان      مجید فرمد      ساعد راعی      حسین محسنی  
دانشکده برق      معاونت برنامه ریزی      دانشکده فنی      دانشگاه تهران  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر      شرکت توانیر

واژه‌های کلیدی : ترانسفورماتور جابجا کننده فاز، PST، کاهش تلفات، جایابی، توسعه شبکه

### چکیده

مطالعات نشان داده است که ترانسفورماتور جابجا کننده فاز، PST (Phase Shifting Transformer) توانایی کاهش تلفات انتقال را دارد. با در نظر گیری این توانایی، در این مقاله مسئله جایابی PST در شبکه سراسری ایران به منظور کاهش تلفات مورد بحث قرار گرفته است. شبکه هدف، شبکه ایران در سال ۱۳۸۸ بوده است. در این شبکه اثر نصب PST در خطوط ۲۳۰ و ۴۰۰ و همچنین بررسی اثر تعویض ترانسفورماتورها با PST، صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده بحث و نتیجه گیری فنی - اقتصادی در جهت تعیین مناسبترین محل نصب PST در شبکه انجام شده است.

هدف اصلی مقاله مقایسه نتایج جایابی مربوط به این سال با نتایج جایابی در سال ۱۳۸۳ بوده است. نکته مهمی که از این مقایسه بدست آمده این است که

محل مناسب نصب PST با توسعه شبکه ایران ( تغییر توپولوژی و شرایط تولید و مصرف ) تغییر می یابد. دلیل این جابجایی نکته جالب دیگری است که این مقاله به آن اشاره دارد و انتظار می رود که جایابی دیگر عناصر FACTS در شبکه ایران از این نکته تأثیر بپذیرد. دلیل جابجائی پاسخ با توجه به این که مازاد تولید و کمبود تولید شبکه در کجاست قابل توجهیه است. در سال ۱۳۸۳ برق منطقه ای مازاندران دارای مازاد تولید و برق تهران به عنوان بزرگترین مصرف کننده همجوار دارای کمبود تولید است. بنابراین منطقی است که این مازاد تولید به سمت برق تهران هدایت شود. نتیجه روند جایابی، PST را به عنوان یک کنترل کننده سیلان توان، به این محل سوق داده است. اما در سال ۸۸ با ورود نیروگاه‌های برق آبی، مازاد تولید به مناطق جنوب کشور منتقل می شود. ولی در این سال نیز برق تهران دارای کمبود تولید است. بنابراین ضروری است که مجدداً این مازاد تولید

به سمت برق تهران هدایت شود. این مسئله باعث می شود که پاسخ جابجا شده و به خط ساوه - پرند منتقل گردد. نتایج بدست آمده در این مقاله ضرورت توجه به این موضوع را در برنامه ریزی های آینده شبکه آشکار می سازد.

## ۱- مقدمه

طراحان در طرح های اولیه مربوطه به سیستم تولید و انتقال، قابلیت تولید و انتقال توان درخواستی را مدنظر قرار می دهند. ولی با گذشت زمان تغییراتی از قبیل رشد مصرف، اتصال شبکه ها به یکدیگر و تأسیس نیروگاهها و خطوط انتقال جدید این توازن را برهم زده و محدودیتهایی را در بهره برداری از شبکه قدرت بوجود می آورد [۱].

در شبکه های غربالی اتصال شبکه ها در کنار مزایای زیادی که دارد، دارای مشکلات عدیده ای نیز هست. از جمله این مشکلات عبور توان در مسیرهای ناخواسته در سیستم انتقال است. این مسئله می تواند موجب افزایش بار غیر مجاز و عدم بهره برداری بهینه از سیستم قدرت شود. لذا بایستی بطریقی توان عبوری از یک مسیر را کنترل نمود.

در نواحی با خطوط طولانی، مسئله فوق مشکل ساز نیست، بلکه مشکل عمده مسئله حد پایداری گذرا و افت ولتاژ غیر مجاز است. به این معنی که برای حفظ پایداری شبکه و تثبیت سطح ولتاژ مجاز، توان عبوری در سیستم انتقال باید محدود شود. در نتیجه، این مشکل باعث می گردد که ظرفیت بارپذیری ( Loadability ) خطوط همراه با افزایش طول خطوط، شدیداً کاهش یابد.

جهت رفع نواقص فوق الذکر و افزایش بهره وری از سیستم های انتقال قدرت، راه حلهایی موجود است. این راه حلها را باید از لحاظ گوناگون بررسی و مقایسه

نمود [۲]. موردی که در این نوشتار دنبال می شود، کنترل پخش بار در حالت دائم است و هدفی که از کنترل سیلان قدرت دارد این است که وضعیت موجود سیلان قدرت را در خطوط انتقال، بگونه ای تغییر دهد که تلفات شبکه کاهش یابد. با توجه به این موضوع آلترناتیوهای مطرح عبارتند از کاربرد خطوط انتقال HVDC یا کاربرد تجهیزات FACTS. در مطالعات انجام شده در معاونت برنامه ریزی شرکت توانیر [۳] خطوط HVDC تا سال ۱۳۸۸ جزء طرحهای شبکه در سطح انتقال نیستند. بنابراین تنها مورد قابل بحث در جهت اهداف این پروژه استفاده از تجهیزات FACTS است.

در میان تجهیزات FACTS تجهیزاتی که بصورت موازی در مدار قرار می گیرند و جریانی را به یک PV باس (که به آن وصل شده اند) تزریق می کنند تأثیری بر روی قدرت حقیقی انتقالی از خط نخواهند داشت. در صورت اتصال این عناصر در وسط یا طرف گیرنده خط، ولتاژ باس مربوطه و در نتیجه قدرت انتقالی از خط تا حدودی قابل کنترل است. از جمله این عناصر میتوان به SVCها (Static Var Compensators) و STATCOM اشاره نمود [۴].

در میان ادوات FACTS تجهیزاتی هستند که می توانند قدرت انتقالی خط را توسط یک ولتاژ تزریقی (سری با خط)، کنترل نمایند. این ولتاژ در ترانسفورماتور جابجا کننده فاز (Phase Shifting Transformer) توسط یک ترانسی به خط تزریق می شود [۵] و یا ولتاژ سری با خط می تواند بگونه ای باشد که با جریان خط متناسب باشد که در اینصورت آنرا از نوع کنترل امپدانس می نامند. در کنترل امپدانس با توجه به اختلاف پتانسیل دو سر خط جریانی از خط عبور می کند که اگر خازن متغیر سری در خط داشته باشیم، افت

PST یکی از قدیمی ترین ادوات FACTS است [۱۰]. این وسیله ترانسفورماتوری است که نسبت تبدیل آن مختلط می باشد. بنابراین فازور ولتاژ، در گذر از اولیه به ثانویه در ضمن تغییر دامنه تغییر فاز نیز می دهد. از PST جهت کنترل سیلان قدرت در حالت مانا [۱۱] و از PST های مجهز به کلیدهای نیمه هادی، جهت کنترل شرایط دینامیک [۱۲] و گذرا [۱۳] می توان استفاده نمود. از جمله کاربردهای PST می توان به:

- کنترل سیلان قدرت در یک خط انتقال،
  - جلوگیری از چرخش قدرت در شبکه های غربالی،
  - انتخاب مسیرهای انتقال با قابلیت اطمینان بالا،
  - جلوگیری از اضافه بار یک خط از دو خط موازی،
  - توسعه PST به IPC و UPFC و
  - بهینه سازی تلفات انتقال در خطوط موازی
- اشاره کرد. در رابطه با بهینه سازی تلفات، در نمونه ای که در [۱۴] بررسی شده است نشان داده شده است که در انتقال توان از دو خط موازی بطور ۱۰۰km، که یکی در سطح ولتاژ ۳۸۰kV و دیگری در سطح ولتاژ ۲۲۰kV است با نصب یک PST، و با تغییر زاویه مربوط به ولتاژ تزریقی به خط، می توان با کنترل سیلان قدرت در خط، تلفات انتقال را از ۱۹MW در حالت بدون PST به مقدار ۱۰MW در حالت تزریق ولتاژ عمودی، کاهش داد. در این مورد با فرض قیمت ۰/۰۵US\$/kWh برای برق مصرفی، صرفه جوئی سالیانه مربوطه برای انتقال ۶۰۰MW حدود ۴ میلیون دلار در سال بوده است.

با توجه به اهمیت اقتصادی این کاربرد، در [۱۵] به بررسی امکان پیاده سازی این مورد در شبکه برق منطقه ای تهران در سال ۱۳۸۳ پرداخته شد. در [۱۵] نشان داده شد که با نصب PST در خط رابط ۲۳۰ کیلوولت قائم شهر- فیروزکوه تلفات انتقال بین

ولتاژ روی خازن بصورت عمودی با ولتاژهای موجود جمع شده و باعث تغییر در قدرت انتقالی عبوری می گردد. این عمل توسط تجهیزاتی مانند CSC (Controlled Series Compansition) [۶] میسر است. در رابطه با یک شبکه غربالی می توان گفت که در این نوع شبکه جهت و مقدار سیلان قدرت با تغییرات میزان تولید و مصرف تغییر می کند. اختلاف فاز بین دو باس در دو انتهای یک خط می تواند تغییر علامت دهد، صفر شود و یا بسیار کوچک گردد. بنابراین در این حالت از کنترل امپدانسی نمی توان زیاد سود جست و منبع ولتاژ سری کنترل شده مناسبتر است، چرا که عملکرد آن مستقل از زوایای فاز بین باس هاست.

در GTO - CSC ولتاژ تزریقی مستقل از جریان خط است ولی این طرح هنوز در مرحله تحقیقاتی است [۷]. کنترلرهای توانا تر دیگری نیز در مرحله تحقیقاتی و آزمایش و یا بصورت نمونه مطرح هستند که انتظار می رود بتوان در آینده نزدیک از آنها استفاده نمود. IPC (Inter - Phase Power Controller) [۸] و (Unified Power Flow Controller) UPFC [۹] از این جمله اند. هسته اصلی این کنترلرها، ترانسفورماتور جابجا کننده فاز، PST است. با ترکیب PST با مبدل های منبع ولتاژ (Voltage Source Convertors) می توان IPC و UPFC را ایجاد نمود. بنابراین با توجه به مطالب مذکور و با توجه به تکنولوژی بالای مبدل های منبع ولتاژ می توان نتیجه گرفت که جهت کنترل سیلان قدرت بهتر است از تجهیزاتی مانند PST که دارای مدلی به فرم منبع ولتاژ سری کنترل شده اند و کاربرد آنها هم اکنون نیز میسر است، استفاده نمود [۲]. طبیعی است که استفاده از UPFC و IPC در آینده دورتر، منوط به در اختیار داشتن و تسلط بر استفاده از PST به تنهایی است.

چهارم ۵ درصد فرض شده است. اطلاعات مذکور در برنامه شبیه ساز PSS/E شرکت (Power Technologies Inc) [۱۸] بصورت بارهای متمرکز در باسهای مربوط به هر ناحیه داده شده است. با توجه به حجم بسیار زیاد جزئیات از آوردن آنها در این مقاله صرف نظر شده ولی تمامی موارد مد نظر بوده و در [۱۶] ارائه شده است.

در مقابل مصرف، نیازمند تولید هستیم. وضعیت تولید نیروگاههای کشور تا سال ۱۳۸۸ با توجه به مطالعات معاونت برنامه ریزی شرکت توانیر به  $40248MW$  خواهد رسید که از این میزان  $17191MW$  در طی سالهای ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۸ وارد مدار خواهد شد [۱۷].

اطلاعات خطوط انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت و اطلاعات ترانسفورماتورهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت که بین سالهای ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۸ وارد مدار خواهند شد، نیز طی جداولی در [۱۶] ارائه شده است.

### ۳- مروری بر روش های جايابی PST

همانگونه که در مقدمه مطرح شد، هدف این پروژه جايابی و تنظیم مناسب PST در جهت کاهش تلفات شبکه است. حل این مسئله بر پایه روش های بهینه سازی میسر است. ولی باید روش مناسب را با توجه به خصوصیات مسئله انتخاب نمود. ایده بسیاری از روش هایی که در حل مسئله بهینه سازی با قيود تساوی (و یا نامساوی) به کار می رود از روش های حل مسائل بهینه سازی بدون قید گرفته شده است. روش های بهینه سازی توابع چند متغیره به طور کلی به دو دسته زیر تقسیم می شوند:

- روش های بهینه سازی مستقیم

- روش های بهینه سازی غیر مستقیم

در روشهای بهینه سازی مستقیم، جهت پیدا کردن

ناحیه تهران و مازندران را یک مگاوات کاهش می دهد. در همین ضمن تلفات ناحیه تهران و کل شبکه ایران بترتیب ۸/۷ و ۲/۸ مگاوات کاهش می یابد. نصب PST در خط ۲۳۰ کیلوولت شرق تهران - فیروزکوه تلفات ناحیه تهران و کل شبکه ایران را بترتیب ۶/۰ و ۲/۶۵ مگاوات کاهش می دهد. باتوجه به این حالات، متوجه می شویم که از دیدگاه اهداف مقاله این منطقه در اولویت اول قرار دارد.

با توجه به مطالعات ارائه شده، انجام بررسی های مشابه در نواحی دیگر شبکه سراسری پیشنهاد و بدنبال آن مطالعات " جايابی PST در شبکه انتقال جهت کاهش تلفات شبکه در سال ۱۳۸۸ " طرح و انجام شد [۱۶]. در بخش های آتی مقاله به بحث نتایج این مطالعه و مقایسه آن با نتایج مطالعات سالهای ۱۳۸۳ خواهیم پرداخت.

### ۲ - اطلاعات تولید و مصرف سال ۱۳۸۸

شبکه سراسری ایران شامل زیر شبکه ها (یا نواحی) متعددی است. این نواحی توسط خطوط انتقال انرژی به یکدیگر متصل می شوند. در مطالعات مربوط به سال ۱۳۸۸ جهت برقراری تراز تولید و مصرف، این نواحی به ۹ قسمت تقسیم شده اند. هر کدام از این نواحی شامل یک یا چند برق منطقه ای هستند.

بر مبنای مطالعات پیش بینی بار انجام شده برای سال ۱۳۸۸ [۱۷]، حداکثر مصرف در تابستان ۱۳۸۸ برای نواحی فوق الذکر جمعاً حدود  $32250$  مگاوات خواهد بود. توان مذکور بین نواحی نه گانه تقسیم خواهد شد. این توانها شامل بار مصرفی هر ناحیه، تلفات انتقال و توزیع و مصرف داخلی نیروگاهها هستند.

در این پیش بینی، رشد بار در طول برنامه پنج ساله سوم ۶ درصد و این رشد در طول برنامه پنج ساله

نقطه بهینه فقط از مقدار تابع در نقاط مختلف استفاده می شود. بر خلاف این موضوع، در روشهای بهینه سازی غیر مستقیم، جهت پیدا کردن نقطه بهینه باید از مشتق مرتبه اول و یا مشتق مرتبه دوم استفاده شود. معیارهای مهم جهت بررسی توانایی یک الگوریتم در حل مسائل بهینه سازی عبارتند از:

- سرعت همگرایی،
  - توانایی رسیدن به پاسخ بهینه تر،
  - پایداری روش عددی،
  - حساسیت الگوریتم و پاسخ بدست آمده نسبت به نقاط شروع متفاوت، و عدم همگرایی به پاسخهای محلی (Local) و
  - اطمینان به جامع (Global) بودن جواب.
- بهینه سازی مملو از مسائلی از قبیل غیر پیوسته بودن، شروط و قيود متعدد و وسیع، فضای جستجوی نويز و مشکلات دیگر می باشد. بنابراین تعجب انگیز نیست که روش های غیر مستقیم با توجه به ذات روش جستجوی آنها در فضای محلی با شروط لازمی مانند پیوستگی و وجود مشتق، به جز برای مسائل محدودی، در اکثر موارد غیر مناسب و کم بازده اند.

استفاده از روش های مستقیم در حل مسائل بهینه سازی علاوه بر آنکه عملاً از سهولت بیشتری برخوردار است، به اطلاعات وسیعی نیز نیاز نداشته، نیازی به حل دسته معادلات غیر خطی ندارد و از نظر واگرایی هم مسلماً مشکلی پدید نمی آورد. در این روش به علت نیاز به تکرارهای زیاد، زمان حل مسئله، ممکن است بسیار طولانی شود. ولی در فاز طراحی و برنامه ریزی شبکه مهمترین نکته رسیدن به نقطه بهینه جامع است و مسئله مدت زمان حل الگوریتم در درجات بعدی از لحاظ اهمیت قرار دارد. یک مزیت مهم در این روش ها این است که احتمال یافتن یک حداکثر محلی نسبت به روشهایی که نقطه به نقطه

حرکت می کنند کاهش می یابد و پاسخ، حساسیت بسیار کمتری نسبت به روش های دیگر در رابطه با نقطه شروع دارد.

حال با توجه به مطالب مذکور می توان در ذیل مروری بر روش های جایابی PST داشت و روش مناسبی را که در راستای اهداف پروژه است، مشخص نمود.

**الف:** در روش مدل سازی در پخش بار بهینه OPF (Optimal Power Flow) می توان همانند [۱۹] متغیرهای مورد نظر را وارد برنامه مذکور نمود. در این جا باید زاویه PST به صورت متغیر کنترلی در معادلات پخش بار بهینه ظاهر گردد. در [۱۹] تلفات توان با استفاده از تنظیم تپ ترانسفورماتورهای شبکه کاهش می یابد ولی در اینجا اندازه ولتاژها تغییر نمی یابد و تنها زاویه آنها به عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته میشود. بدون آنکه وارد جزئیات شویم به اشکال عمده این روش که همان امکان واگرایی یا همگرایی به نقاط بهینه محلی است اشاره می کنیم. این اشکال برای طراحان در فاز طراحی قابل قبول نیست.

**ب:** در جایابی به روش ضرایب حساسیت با استفاده از ضرایبی به نام ضرایب حساسیت، بهترین مکان برای ترانسفورماتور جابجا کننده فاز تعیین می شود [۲۰]. ضریب حساسیت عبارت است از تغییرات توان عبوری از خط رابط باس های  $p$  و  $q$  نسبت به تغییرات زاویه فاز PST قرار گرفته در خط رابط باس های  $i$  و  $j$ . این روش بیانگر این است که با توجه به اینکه برخی خطوط در شبکه برای نصب جابجا کننده فاز محل های حساستری هستند بنابراین تاثیر بیشتری در کاهش تلفات نیز خواهند داشت. این روش یک روش کارآمد در تعیین محل PST می باشد ولی با بزرگ شدن شبکه حجم ماتریس ها و محاسبات مربوطه خیلی بالا می رود و نهایتاً از روش ضرایب

است، مشکلات حجم زیاد برنامه نویسی، امکان همگرا نشدن و حجم زیاد محاسبات را با خود به همراه دارد.

ه: در جایابی به روش سیلان بهینه توان از ایده

ابتکاری خاصی استفاده شده است. می دانیم که اگر توزیع جریان در شبکه امپدانس با حالتی که شبکه کاملاً مقاومتی است یکسان شود، تلفات شبکه امپدانسی حداقل می گردد. بنابراین پخش بار و سیلان توان در یک شبکه در صورتی بهینه و ایده آل است که توزیع جریان شبکه امپدانسی به سمت توزیع جریان شبکه مقاومتی میل کند. از این ایده که در [۲۳] برای کاهش تلفات در شبکه های توزیع با **Reconfiguration** استفاده شده است، در [۲۴] برای نیل به هدف کاهش تلفات سیستم انتقال توسط **PST** بهره برداری شده است. مراحل کار در این روش بدین ترتیب است که ابتدا باید شبکه را کاملاً مقاومتی کنیم، یعنی راکتانس ها، تولیدات و مصارف توان را صفر کنیم. سپس با انجام پخش بار، سیلان توان بهینه را در شبکه و تمامی خطوط بدست آوریم. حال در هر خط از شبکه واقعی، **PST** قرارداده و زاویه آن را طوری تنظیم می کنیم که سیلان بهینه مربوط به شرایط مقاومتی از آن خط عبور کند. اکنون می توانیم تلفات شبکه را که از پخش بار مربوطه بدست آمده است برای هر حالت داشته باشیم. حال از مقایسه  $n$  پخش بار برای شبکه ای با  $n$  محل نصب ممکن، موردی که دارای کمترین تلفات است به عنوان پاسخ مشخص خواهد شد. چالش اساسی این روش همگرا کردن پخش بار در شبکه مقاومتی است. چون در شبکه انتقال مقادیر مقاومت ها بسیار کوچک می باشند.

و: در جایابی **PST** می توان از تئوری گراف استفاده نمود و تعداد و محل های مناسب نصب ترانسفورماتور جابجا کننده فاز را تعیین نمود [۲۵]. این روش یک روش دقیق و کاراست ولی کارآیی آن

لاگراژ در آن استفاده می شود که پیاده سازی آن از لحاظ همگرایی عددی مشکلاتی را به همراه داشته است.

ج: در جایابی به روش الگوریتم ژنتیکی برای یک تعداد مشخص از جابجا کننده های فاز، تابع هدفی از سیستم بایستی بهینه سازی شود [۲۱]. متغیر مکان یعنی محل نصب جابجا کننده فاز به سختی می تواند به یک برنامه بهینه سازی اضافه شود و این به علت ماهیت گسسته بودن چنین متغیری است. پس برای تنظیم جابجا کننده فاز از روش های معمول بهینه سازی تابع هدف می توان استفاده کرد ولی مکان آن توسط الگوریتم ژنتیک تعیین می گردد. این روش اگرچه روشی مقاوم بوده و به مقادیر بهینه محلی همگرا نمی شود و معمولاً همگرایی آن به سمت نقطه بهینه جامع است ولی باز هم همانند روش های عددی ممکن است مشکل واگرایی ایجاد نماید. اشکال دیگر این روش آن است که برای شبکه های بزرگ به زمان حل بسیار طولانی نیاز دارد.

د: در روش جایابی به روش **Screening** ابتدا برای تمامی محل های ممکن نصب **PST** مقداری موسوم به مقدار حدی محاسبه می شود [۲۲]. سپس با توجه به اینکه محل هایی با مقادیر حدی کمتر به میزان کمتری تابع هدف را بهبود می بخشد از روند بررسی خارج می شوند. یعنی به این ترتیب تعداد محل های مطلوب از تعداد کل خطوط شبکه کمتر است. در ادامه تابع هدف بهینه سازی برای هر یک از محل های باقیمانده محاسبه می شود و در نهایت بهترین مکان برای **PST** با مقایسه کلیه مقادیر بدست خواهد آمد [۲۲]. روند بررسی در این روش در مقایسه با روش های دیگری که صرفاً ریاضی و محاسباتی است تا حدودی متفاوت است ولی از آنجا که نهایتاً برای تنظیم **PST** در محل مناسب از روش نیوتن استفاده شده

#### ۴- شرایط گوناگون تولید و مصرف

جهت انجام مطالعات جایابی در شبکه سال ۱۳۸۸ باید تمام حالات در فضای جستجوی ماتریسی بررسی شوند. در این راستا برای اینکه نتایج بدست آمده تا حد ممکن کلیت موضوع را حفظ کنند، باید با توجه به ظرفیت های تعیین شده، تراز تولید و مصرف را نیز در حالت های گوناگون مد نظر داشت. سه حالت زیر می تواند وضعیت شبکه را در اغلب مواقع بازنمایی کند:

- **حالت Off-peak-1**: حالت بار میانی با فرض کاهش تولید در نیروگاه های آبی
- **حالت Off-peak-2**: حالت بار میانی با فرض افزایش تولید در نیروگاه های آبی
- **حالت Peak**: پیک یا حداکثر بار، بدترین شرایط بار از دید شبکه

دلیل انتخاب دو حالت برای بار میانی آن است که تولید در نیروگاه های آبی وابسته به شرایط آب و هوایی هر سال دارد. لذا در نظر گرفتن تولید نیروگاه های آبی در دو حالت کمینه و بیشینه باعث جامعیت مطالعات می شود. جدول ۱ خلاصه ای از شرایط تولید در نیروگاه های حرارتی، آبی و همچنین تلفات کل شبکه را در سه حالت Off-peak-1، Off-peak-2 و Peak نشان می دهد.

با توجه به شرایط موجود و ظرفیت های جدید شبکه که توسط نرم افزار WASP برآورد شده است، تخصیص تولید و مصرف مناطق برق های منطقه ای بر این اساس صورت گرفته است که توان عبوری از Tie Line-ها به حداقل سوق یابد [۱۷].

جدول ۱: تولید نیروگاه ها و تلفات شبکه در شرایط گوناگون،

( واحد MW )

تلفات شبکه	تولید کل	تولید آبی	تولید حرارتی	حالت
۳۹۰/۶	۲۶۰۸۹	۵۸۸۴	۲۰۲۰۵	Offpeak-1
۵۸۶/۱	۲۶۲۸۴	۹۵۶۷	۱۶۷۱۷	Offpeak-2
۶۳۲/۵	۳۴۸۸۲	۸۱۴۹	۲۶۷۳۳	Peak

برای شبکه های بزرگ و توانایی رسیدن آن به بهینه جامع بررسی نشده است.

ز: در روش جستجوی مستقیم دیگری که مد نظر این مقاله است ابتدا محورهای مربوط به هر متغیر فضای  $R^n$  به  $m$  قسمت، بخش می شود. حال از تقاطع خطوط گذرنده بر نقاط واقع بر روی این محورها، یک فضای جستجوی ناپیوسته  $n$  بعدی بدست خواهد آمد. بنابراین فضای پیوسته جستجوی  $R^n$  به یک شبکه ماتریسی  $n$  بعدی تبدیل شده است و حالت های ممکن، درایه ها یا نقاط این شبکه ماتریسی  $n$  بعدی خواهند بود. روش کار این است که تمامی این نقاط بررسی شوند سپس در مواردی که نقطه یا نقاط خاصی تلفات کمتری را نسبت به مابقی نقاط دارند به عنوان نقاط حساس انتخاب شوند، آنگاه با تظریف شبکه در حوالی نقاط حساس، شرایط مناسبتر جستجو و تحقیق شود.

با توجه به مجموع مطالبی که ارائه شد می توان گفت که در بین روش های بهینه سازی توابع چند متغیره، روش های جستجوی مستقیم بر روش های غیر مستقیم بهینه سازی ارجح هستند. چون با توجه به این که ما در فاز طراحی هستیم، رسیدن به جواب جامع برای ما از اهمیت ویژه ای برخوردار است و زمان انجام محاسبات چندان مهم نیست.

با در نظر گرفتن اهمیت مسئله اطمینان به پاسخ در فاز طراحی و همچنین با توجه به توانایی های کامپیوترهای امروزی، در بین روش های مستقیم چون بدنبال جایابی یک PST در یک دوره خاص زمانی هستیم طبیعی است که جهت گیری کاری به سمت روش جستجوی مستقیم ماتریسی سوق یابد. در اینصورت فقط نیازمند به برنامه پخش بار با توانایی مدل سازی PST هستیم و دیگر ضرورتی به تهیه یک برنامه جدید نیست.

## ۵- بهترین موقعیت های نصب PST در

سال ۱۳۸۸

در سه حالت Off-peak-1, Off-peak-2 و Peak شبیه سازی اثر نصب PST در خطوط ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت و همچنین بررسی اثر تعویض ترانسفورماتورها ۴۰۰/۲۳۰ با PST صورت گرفت. از میان نتایج شبیه سازی، هدف یافتن حالاتی است که تلفات آن از تلفات شبکه در حالت بدون PST کمتر باشد. روش کار برای یافتن این حالات، همان روش جستجوی مستقیم در شبکه ماتریسی است. یعنی PST در تمامی نقاط ممکن مربوط به شبکه انتقال سال ۱۳۸۸ شبیه سازی شده و اثر نصب آن بر تلفات بررسی می شود.

نتیجه جایابی PST در حالت Off-peak-1 در خطوط ۲۳۰ کیلوولت در جدول ۲ درج شده است. با توجه به این جدول دیده می شود که در بهترین حالت با تنظیم توان عبوری از PST در خط پرند - ساوه (در مقدار ۵۳/۰ MW) تلفات شبکه به مقدار ۳۸۸/۸۲ MW می رسد. یعنی به میزان ۱/۷۸ MW کاهش تلفات داریم. (تلفات مبنا = ۳۹۰/۶ MW)

جدول ۲: اثر نصب PST در خطوط در شرایط Off-peak-1

تلفات کل MW	تنظیم زاویه (°)	کد باس پایان خط	باس شروع خط و محل نصب
۳۸۸/۸۲	۶/۰۰	PRAND2	SAVEH2
۳۸۸/۹۲	۷/۶۰	JSAVE2	PRAND2
۳۸۹/۸۶	۴/۳۷	FROUD2	GHOM22

نتایج جایابی در خطوط ۴۰۰ کیلوولت مشخص کرده است که کاندیدای خاصی برای نصب PST در خطوط ۴۰۰ کیلوولت وجود ندارد. اما تاثیر تعویض PST باترانسفورماتورهای KV ۲۳۰/۴۰۰ قابل توجه

است. جدول ۳ بهترین نتایج را در این رابطه ارائه میکند. همانگونه که از این جدول مشخص است می توان گفت که کاندیداهای برتر، پستهای ۲۳۰/۴۰۰ کیلوولتی فیروزبهرام ( FIBAH2 , FIBAH4 ) و شرق کرمانشاه ( E.BAK2 , E.BAK4 ) هستند. البته در درجه بعدی اهمیت، پست انجیرک ( ANJIR2 , ANJIR4 ) قرار دارد. در بهترین حالت دیده می شود که با تنظیم PST منصوب در پست شرق کرمانشاه، تلفات شبکه به مقداری ۳۸۸/۰۵ MW می رسد، یعنی به میزان ۲/۵۵ MW کاهش تلفات داریم. تاثیر نصب PST در خطوط ۲۳۰ KV بر روی تلفات شبکه، در شرایط تولید و مصرف Off - Peak 2 -، در جدول ۴ درج شده است. همانگونه که از نتایج این جدول مشخص است می توان گفت که محل های مناسب نصب PST در خطوط ۲۳۰ کیلوولت، باس های ساوه ( SAVEH2 )، جاده ساوه ( JSAVE2 ) و پرند ( PARAND2 ) هستند. البته باس های شیراز ( SHIRA2 ) و چنارشاهیجان ( CHNAR2 ) نیز با همان درجه از اهمیت مطرح می باشند. با توجه به این جدول دیده می شود که در بهترین حالت با تنظیم توان عبوری از PST در خط ۲۳۰ کیلوولتی شیراز - چنارشاهیجان می توان، تلفات شبکه را به مقدار ۵۸۳/۵۳ MW رساند، یعنی به میزان ۲/۵۷ MW کاهش داد. (تلفات مبنا = ۵۸۶/۱ MW)

جدول ۴: اثر نصب PST در خطوط در شرایط Off - Peak -2

تلفات کل MW	تنظیم زاویه (°)	کد باس پایان خط	باس شروع خط و محل نصب
۵۸۴/۲۹	۶/۳۰	PRAND2	SAVEH2
۵۸۴/۳۱	-۶/۲۹	SAVEH2	PRAND2
۵۸۴/۳۹	۷/۹۲	JSAVE2	PRAND2
۵۸۳/۵۳	۶/۷۰	SHIRA2	GHOM22



با توجه به این جدول دیده می شود که در بهترین حالت با تنظیم توان عبوری از PST در خط پرند- ساوه در مقدار  $59.8 \text{ MW}$ ، تلفات شبکه به مقدار  $2.37 \text{ MW}$  می رسد، یعنی به میزان  $630.13 \text{ MW}$  کاهش تلفات داریم. (تلفات مبنا =  $632.5 \text{ MW}$ )

در این حالت نیز میزان تاثیر PST بر کاهش تلفات شبکه در صورت نصب آن در خطوط  $400$  کیلوولت بسیار ناچیز بوده است ولی اثر تعویض ترانسفورماتورهای  $230/400 \text{ KV}$  با PST قابل ملاحظه است. نتایج مربوطه در جدول ۷ درج شده است. همانگونه که از مندرجات این جدول مشخص است می توان گفت که کاندیداهای برتر پستهای  $230/400$  کیلوولتی، علی آباد (ALI A2, (A4، تبریز (TABRI2, TABRI4) و کن (KAN 4) هستند. در بهترین حالت دیده می شود که با تنظیم PST منصوب در پست علی آباد، تلفات شبکه به مقدار  $630.56 \text{ MW}$  می رسد، یعنی به میزان  $1.94 \text{ MW}$  کاهش تلفات داریم.

#### ۶- بررسی های اقتصادی

بعد از انجام بررسیهای فنی، تعدادی پاسخ و طرح مناسب بدست آمد. حال در مرحله ای قرار گرفته ایم که باید از میان طرحهای موجود مواردی را که از لحاظ اقتصادی توجیه پذیراند انتخاب کنیم. جهت مقایسه های اقتصادی باید ارزش اقتصادی تلفات را مشخص نمود، یعنی مشخص نمود که به ازای هر کیلووات کاهش تلفات به چه میزان از لحاظ اقتصادی سود کرده ایم. در این رابطه روشهای گوناگونی وجود دارد. در این مقاله از روشی که در دفتر تولید و دفتر شبکه معاونت برنامه ریزی توانیر مطرح است، استفاده می شود [۲۶]. در این روش موضوع هزینه تلفات، CL را، به سه بخش تقسیم می کنند، یکی تعیین

در این حالت نیز شبیه سازی ها نشان داده است که میزان تاثیر PST بر کاهش تلفات شبکه در صورت نصب آن در خطوط  $400$  کیلوولت ناچیز است ولی جدول ۵ نشان دهنده این موضوع است که تاثیر تعویض PST باترانسفورماتورهای  $230/400 \text{ KV}$  در شرایط تولید و مصرف 2 - Peak - Off می تواند مفید باشد. با توجه به نتایج این جدول مشخص است که کاندیداهای برتر، پستهای  $230/400$  کیلوولتی، فیروزبهرام (FIBAH2, FIBAH4) و البته در درجه بعدی اهمیت، پست انجیرک (ANJIR 2, (ANJIR 4) هستند. دیده می شود که در بهترین حالت با تنظیم PST منصوب در پست فیروزبهرام، می توان تلفات شبکه را به مقدار  $581.3 \text{ MW}$  رساند، یعنی  $4/8 \text{ MW}$  کاهش تلفات که این نتیجه ای بسیار چشم گیر است.

نتیجه جایابی PST در حالت Peak در خطوط  $230 \text{ kv}$  در جدول ۶ ارائه شده است. همان گونه که از جدول مشخص است مجدداً کاندیداهای نصب PST در خطوط  $230$  کیلوولتی، باس های ساوه (SAVEH2)، جاده ساوه (JSAVE2) و پرند (PARAND2) هستند. البته همانند حالات - Off - Peak - 1 و - Off - Peak - 2 مواردی دیگری نیز وجود دارند که در درجات اهمیت بعدی قرار دارند. این محلها عبارتند از باس های دز (DEZ2)، خرم آباد (KHORM2)، شیراز (SHIRA2) و چنار شاهینجان (CHNAR2).

جدول ۶: اثر نصب PST در خطوط  $230$  در شرایط Peak با

تظریف شبکه جستجو

تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( $^{\circ}$ )	کد باس پایان خط	باس شروع خط و محل نصب
630.13	7/00	PRAND2	SAVEH2
630.37	8/96	JSAVE2	PRAND2
631.38	-4/34	CHNAR2	SHIRA2
631.22	5/12	KHORM2	DEZ2
631.32	5/06	KHORM2	DEHAK2

جدول ۳: اثر نصب PST بجای ترانس های ۲۳۰/۴۰۰ در شرایط Off-peak - 1

تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع	تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع
۳۹۰/۴۳	-۱/۴۹۶	REY N4	REY N2	۳۹۰/۶۰	۱/۰۱۹	SEM N24	SEM N22
۳۹۰/۲۵	-۲/۶۴۵	FASA4	FASA2	۳۹۰/۴۵	۱/۱۱۱	KHORM4	KHORM2
۳۹۰/۵۲	۱/۱۳۵	NAJAF4	NAJAF2	۳۹۰/۳۸	۰/۶۷۰	ESGRT4	ESGRT2
۳۹۰/۴۹	۱/۲۴۳	BUATM4	BUATM2	۳۹۰/۴۹	۱/۳۹۲	CHOGH4	CHOGH2
۳۹۰/۵۹	۱/۱۹۳	AHWA24	AHWA22	۳۹۰/۳۵	-۱/۲۳۵	ALI A4	ALI A2
۳۹۰/۲۸	-۳/۵۸۴	TABRI 4	TABRI 2	۳۹۰/۵۹	-۴/۱۰۲	BANDP4	BANDP2
۳۹۰/۲۴	-۲/۷۴۵	KANI 4	KANI 2	۳۹۰/۱۲	-۰/۴۶۰	SHIRA4	SHIRA2
۳۸۸/۰۵	-۳/۳۲۰	E.BAK4	E.BAK2	۳۸۸/۱۸	-۱/۵۳۰	FIBAH4	FIBAH2
۳۸۹/۲۸	-۰/۲۳۵	ANJIR4	ANJIR2	۳۹۰/۳۹	۰/۷۶۴	B.ABB4	B.ABB2

جدول ۵: تعویض PST با ترانس های ۲۳۰/۴۰۰ در شرایط Off-peak - 2

تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع	تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع
۵۸۴/۹۱	۴/۰۰۲	KHORM4	KHORM2	۵۸۵/۹۹	-۱/۲۰۱	REY N4	REY N2
۵۸۵/۶۰	۲/۴۷۵	ESGRT4	ESGRT2	۵۸۵/۴۲	-۳/۹۷۰	FASA4	FASA2
۵۸۶/۰۰	۱/۳۴۳	BUATM4	BUATM2	۵۸۶/۰۵	۰/۸۳۹	CHOGH4	CHOGH2
۵۸۵/۶۶	۲/۹۳۲	AHMA24	AHMA22	۵۸۵/۶۳	-۳/۱۷۰	ALI A4	ALI A2
۵۸۵/۶۵	-۲/۳۰۴	TABRI 4	TABRI 2	۵۸۵/۹۲	-۲/۸۶۸	BANDP4	BANDP2
۵۸۱/۳۰	-۱/۱۱۷	FIBAH4	FIBAH2	۵۸۵/۹۹	-۲/۱۰۰	KAN 14	KAN 12
				۵۸۴/۸۳	-۰/۶۶۸	ANJIR4	ANJIR2

جدول ۷: اثر نصب PST بجای ترانس های ۲۳۰/۴۰۰ در شرایط Peak

تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع	تلفات کل MW	تنظیم زاویه ( <sup>0</sup> )	باس پایان	باس شروع
۶۳۱/۶۴	-۴/۰۱۴	FASA4	FASA2	۶۳۲/۱۹	۱/۵۳۷	KHORM4	KHORM2
۶۳۲/۳۹	۱/۲۰۰	CHOGH4	CHOGH2	۶۳۱/۸۱	۲/۹۰۶	ESGRT4	ESGRT2
۶۳۰/۵۶	-۷/۰۱۶	ALI A4	ALI A2	۶۳۲/۳۴	۱/۱۸۸	BUATM4	BUATM2
۶۳۲/۱۳	-۲/۶۸۴	BANDP4	BANDP2	۶۳۲/۰۵	۲/۷۴۵	AHWA24	AHWA22
۶۳۱/۲۱	-۲/۸۳۲	KAN 14	KAN 12	۶۳۰/۹۱	-۳/۸۵۵	TABRI 4	TABRI 2
۶۳۲/۴۵	۰/۹۱۷	ANJIR4	ANJIR2	۶۳۲/۳۲	-۱/۱۵۶	FIBAH4	FIBAH2

جهت تولید یک کیلووات برق، CEL و نهایتاً هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به هر کیلووات برق،

هزینه های سرمایه گذاری جهت تولید یک کیلووات برق، دیگری تعیین هزینه سوخت مصرفی

CRM. بدین ترتیب از جمع این سه مقدار می توان گفت که هر کیلووات کاهش تلفات چه ارزش اقتصادی به همراه دارد.

$$CL = CPL + CEL + CRM \frac{\$}{KW} \quad (1)$$

در [۱۶] نشان داده شده است که هزینه کل تلفات برابر است با:

$$CL = 1384/5 \frac{\$}{KW} \quad (2)$$

در این جا ضروری بود که از روش فوق هزینه کل تلفات محاسبه می شد، چرا که نباید فراموش کرد که هدف از نصب PST، کاهش تلفات است و آلترناتیو مقابل نصب و کاربرد PST، تولید در نیروگاه به میزان تلفات کاهش یافته است. حال با توجه به مقادیر به دست آمده می توان گفت که کاهش تلفات ناشی از نصب PST چه میزان سوداز لحاظ اقتصادی به همراه خواهد داشت. سپس می توان این نتیجه را مبنای مقایسه با قیمت PST قرار داد. با توجه به مکاتبات انجام شده با سازندگان مختلف PST، قیمت PST به ازای هر MVA تخمین زده شده است [۱۶].

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده، این امکان فراهم شده است که نتایج از لحاظ اقتصادی با هم مقایسه شوند و مواردی که از نظر اهداف مقاله مناسب می باشند، انتخاب گردند. این موارد عبارت بوده اند از [۱۶]:

– تعویض دو ترانسفورماتور ۲۳۰/۴۰۰KV به قدرت ۲۰۰MVA مربوط به پست شرق کرمانشاه با دو PST با همان مشخصات و با تغییرات جابجائی فاز (Phase shift)،  $\pm 15^\circ$  در تراز تولید و مصرف Off-peak-1

– تعویض دو ترانسفورماتور ۲۳۰/۴۰۰kv به قدرت ۵۰۰MVA مربوط به پست فیروزبهرام با

دو PST با همان مشخصات و با تغییرات جابجائی فاز (Phase shift)،  $\pm 15^\circ$  در تراز تولید و مصرف Off-peak-2

– نصب یک PST در خط ساوه-پرنده به مشخصات ۳۰۰ MVA و ۲۳۰/۲۳۰ kv و با تغییرات جابجائی فاز (Phase shift)،  $\pm 15^\circ$  در تراز تولید و مصرف peak

در بین سه مورد فوق، با وجود اینکه دو مورد اول منجر به سود بیشتری می شوند ولی طرح نصب PST در خط ساوه-پرنده پیشنهاد اصلی این تحقیق بشمار می آید، چون این حالت در شرایط پیک روی داده است. دلیل این انتخاب این است که برنامه ریزی تولید برای پوشش شرایط پیک است و سرمایه گذاری تولید نیز در جهت پوشش شرایط فوق صورت می گیرد.

نکته قابل توجه در تفاوت نتایج بدست آمده در سال ۱۳۸۳ [۱۵] و نتایج مطرح شده حاضر است [۱۶]. به بحث در این مورد در بخش نتیجه گیری و جمع بندی خواهیم پرداخت.

## ۷- نتیجه گیری

موارد کاربرد زیادی برای PST مطرح است که یکی از این موارد، یعنی حداقل سازی تلفات انتقال مد نظر این مقاله می باشد. با در نظر داشتن این هدف پس از مشخص سازی توپولوژی شبکه در سال ۱۳۸۸ از لحاظ نحوه اتصال باسها و محل قرارگیری ترانسها و نیروگاهها، جمع آوری اطلاعات شبکه برقهای منطقه ای در سطوح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت شامل خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و نیروگاهها، اثر نصب PST در خطوط ۲۳۰ و ۴۰۰ و همچنین بررسی اثر تعویض ترانسفورماتورها با PST، صورت پذیرفت. برای هر چه بیشتر جامع تر

شدن نتایج، این بررسی ها در حالت های گوناگون تولید و مصرف شبکه در سال ۱۳۸۸ یعنی Off-peak-1، 2 و Off-peak انجام شد.

با توجه به نتایج بدست آمده بحث و نتیجه گیری فنی در جهت تعیین مناسبترین محل نصب PST در شبکه مورد نظر برای کاهش تلفات انجام شد. این حالات مواردی هستند که باید آنها را از دیدگاه مطالعات اقتصادی نیز بررسی نمود. با انجام این مطالعات ارزش اقتصادی کاهش تلفات تعیین شد. با توجه به مقادیر بدست آمده، مشخص شد که کاهش ناشی از نصب PST چه میزان سود از لحاظ اقتصادی به همراه خواهد داشت. سپس این نتیجه مبنای مقایسه با قیمت PST قرار گرفت. با انجام این مطالعات ارزش اقتصادی کاهش تلفات بعثت نصب PST، برای حالات مناسب سال ۱۳۸۸ ارائه شد. در بررسی دقیق نتایج بدست آمده می توان نکات زیر را نتیجه گیری نمود:

PST می تواند امکان کاهش تلفات در دالانهای انتقال انرژی موازی را میسر سازد.

می توان با نصب PST در سطوح ولتاژ یکسان و در محل های مناسب، تلفات را کاهش داد.

با مقایسه حالات مناسب مربوط به نصب PST در سطوح ولتاژ یکسان، مشخص می گردد که نصب PST در سطح ولتاژ ۲۳۰/۲۳۰ کیلوولت حالات مناسبتر بیشتری را نسبت به نصب PST در سطح ولتاژ ۴۰۰/۴۰۰ کیلوولت دارد. این نکته نشان دهنده این مسئله مهم است که تقسیم بار در سیستم انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت ایران مناسب نیست و PST سعی در انتقال سیلان توان به سطح ولتاژ بالاتر را دارد.

تعداد حالات بررسی شده در رابطه با تعویض ترانسفورماتورهای ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت با PST، با

توجه به تعداد کم این ترانسفورماتورها، کم بوده است، در حالیکه تعداد بررسیهای انجام شده در رابطه با نصب PST در خطوط بسیار زیاد است. با مقایسه حالات مناسب بدست آمده مشخص می گردد که احتمال کاهش تلفات با تعویض ترانسفورماتورهای ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت با PST بیشتر از احتمال کاهش تلفات با نصب PST در خطوط است.

با مقایسه نتایج مربوط به سالهای ۱۳۷۹، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ مشخص می گردد که با گذشت زمان تعداد حالات مناسبتر بیشتری برای کاربرد PST جهت کاهش تلفات، در شبکه ایران مطرح خواهد شد. این موضوع بدلیل هر چه بیشتر غربالی تر شدن شبکه ایران با گذشت زمان است.

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می گردد که زاویه ولتاژ تزریقی توسط PST محدوده کوچکی را حول و حوش  $\pm 10^\circ$  درجه دارد. اهمیت این موضوع برای بررسیهای اقتصادی است. چون قیمت PST وابسته به محدوده توانایی آن در میزان تغییر زاویه ولتاژ تزریقی است.

طرح نصب PST در خط ساوه - پرند، پیشنهاد اصلی این تحقیق برای سال ۱۳۸۸ بشمار می آید. در بهترین حالات، جایابی PST در شبکه سال ۱۳۸۳ برق منطقه ای تهران مشخص ساخت که نصب یک PST در خط رابط ۲۳۰ کیلوولت قائم شهر - فیروزکوه تلفات شبکه برق ایران را ۲/۸ مگاوات کاهش می دهد. همچنین در صورت نصب PST در خط ۲۳۰ کیلوولت شرق تهران - فیروزکوه در همان سال، تلفات شبکه برق ایران ۲/۶۵ مگاوات کاهش می یابد.

نکته مهمی که از مقایسه نتایج سال ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ بدست می آید این است که محل مناسب نصب PST با تغییر توپولوژی و شرایط تولید و مصرف تغییر می یابد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت برق منطقه ای تهران برای حمایت‌های انجام شده از این تحقیق در چارچوب پروژه تحقیقاتی "جابجایی PST در شبکه انتقال جهت کاهش تلفات شبکه در شرایط حالت دائم" تشکر می نمایند.

## مراجع

[۱] کمیته تخصصی FACTS، "سیستمهای انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر و کاربرد آنها در شبکه سراسری برق ایران"، نشریه علمی برق، شماره ۲۹، زمستان ۱۳۷۹.

[۲] Cigre Task Force 38.01.06, "Load Flow Control in High Voltage power Systems using FACTS Controls", Jan. 1996.

[۳] "مصوبات و دیگرام تک خطی شبکه ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت برق کشور برای سال ۱۳۸۸"، وزارت نیرو، توانیر، معاونت برنامه ریزی توانیر، دفتر برنامه ریزی شبکه، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰.

[۴] J.E.Hill and W.T. Norris, Exact Analysis of a Multipulse Shunt Converter Compensator or statcon. I. Performance IEE proceedings - Generation, Transmission and Distribution Vol.144, No.2, March 1997, pp.213-218

[۵] س. نبوی نیایی، ر. ایروانی، "مدل سازی و بررسی رفتار تغییر دهنده‌های فاز برای سیستم های نوین انرژی الکتریکی FACTS، در حالت مانا"، پنجمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۷-۱۹ اردیبهشت ۱۳۷۶، صفحات ۳۱-۲ الی ۳۸-۲.

[۶] E.Larsen, C.Bowler, B.Damsky, S.Nilson, "Benefits of Thyristor Controlled series compensation CIGRE 1992 session",

نتیجه مهم دیگری که از مقایسه نتایج شبکه سراسری ایران در سال های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ بدست می آید این است که دلیل جابجایی پاسخ (نتیجه جابجایی محل نصب PST) با توجه به این که مازاد تولید و کمبود تولید شبکه در کجاست قابل توجیه است. در سال ۱۳۸۳ برق منطقه ای مازندران دارای مازاد تولید و برق تهران دارای کمبود تولید است. بنابراین منطقی است که این مازاد تولید به سمت برق تهران هدایت شود. این مسئله در شرایط عادی تا حد شرایط موجود شبکه ممکن است. ولی PST به عنوان یک کنترل کننده سیلان توان می تواند این مسئله را براحتی حل کند و همانگونه که دیده می شود نتایج جابجایی، PST را به سمتی سوق داده است که مفیدترین نقش را در کنترل سیلان توان داشته باشد. (البته باید توجه داشت که دیگر عناصر FACTS نیز در این رابطه می توانند کارساز باشند).

اما در سال ۸۸ با ورود نیروگاه های برق آبی، مازاد تولید به مناطق جنوب کشور منتقل می شود. ولی در این سال نیز برق تهران دارای کمبود تولید است. بنابراین ضروری است که مجدداً این مازاد تولید را به سمت برق تهران هدایت نمود. این مسئله باعث می شود که پاسخ جابجا شده و به خط ساوه - پرند منتقل گردد.

با توجه به نکات فوق می توان گفت که جابجایی PST در پریودهای حداکثر چند ساله قابل قبول خواهد بود. این نکته در مورد عناصر FACTS نیز صادق خواهد بود. بنابراین ضروری است که در برنامه ریزی شبکه به این نکته بسیار مهم توجه داشت. البته امکان تغییر محل نصب تجهیزات مذکور نیز می تواند نکته دیگری باشد. یعنی این تجهیزات می توانند در شبکه جابجا شوند و اهداف مورد نظر بهره بردار از سیستم را با توجه به تغییرات شبکه برآورده سازند.

- [۱۵] گ. قره پتیان، م. فرمد، س. راعی، ح. محسنی و ح. عسکریان، " بررسی امکان کاهش تلفات انتقال با تقسیم بار بین خطوط موازی به کمک تغییر دهنده‌های فاز "، پروژه تحقیقاتی ۷۶/۰۰۴ برق منطقه‌ای تهران، گزارش نهائی، آذر ۱۳۷۸
- [۱۶] گ. قره پتیان، م. فرمد، س. راعی و ح. محسنی، " جایابی PST در شبکه انتقال جهت کاهش تلفات شبکه در شرایط حالت دائم " پروژه تحقیقاتی ۱۵-۷۹/۱۱/۲۲ برق منطقه ای تهران، گزارش نهائی، مرداد ۱۳۸۱.
- [۱۷] " گزارش برنامه ریزی تولید و شبکه برای سال ۱۳۸۸"، وزارت نیرو، توانیر، معاونت برنامه ریزی توانیر، دفتر تولید و شبکه، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰
- [۱۸] "دستورالعمل کار با برنامه PSS/E"، شرکت PTI (Power Technologies Inc)، ۱۹۹۴.
- [۱۹] A.H. Miragha , R.Barati , G.B. Gharehpetian " Optimal Tap setting and Var compensation Effect on Energy consumption of Electrical Auxillary system of Steam power plants " , 17-th IEEE TENCON 2002 , Oct.28-31 2002 , Beijing China , pp.1791-1796.
- [۲۰] Kai Xing , George Kusic , " Application of Thyristor controlled phase shifters to Minimize Real power Losses and Augment Stability of power systems " , IEEE Transactions on Energy conversion Vol.3,No.4,Dec.1988.
- [۲۱] Pierre paterni , Sylvain vitet , Michael Bena and Akihiko yokoyama , " optimal Location of phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm IEEE Transactions on , " Algorithm power systems Vol.14 , No.1 , Feb.1999
- [۲۲] Parnjit Damrong Kulkamjorn , Prakash k.Arcot and Peter Dcount. " A screening Technique for Optimally Locating of phase shifters in power systems , " proceeding of IEEE/PES 30 Aug - 5 sep., 1992 , paris , France L.Gyugyi , N.G. Hingorani , P.R. Nannery , N.Tai , " Advanced static Var compensator Using Gate Turn-off Thyristors for utility Applications " , CIGRE 1990 Session , 26 Aug - 1 Sep., 1990 , Paris , France J.Brochu ,F.Beauregard , J.Lemay G.Morin , P.Pelleiter and R.S. Thallam , Application of the interphase Power controller technology for transmission Line power flow control IEEE Transactions on power Delivery , Vol.12, No.2, April 1997 , pp.888-894. A.Edris , A.S. Mehraban , M. Rahman L.Gyugyi , S.Arabi , T.Reitman controlling the flow of Real and Reactive power IEEE computer Application in Power , Jan. 1998 ,pp.20-25 W.J. Lyman controlling power flow phase shifting Equipment AIEE with Trans , Vol.49 , July 1930 , pp.825-831. [۱۱] م. فرمد، " معرفی ترانسفورماتور جابه جا کننده فاز و مواردی از کاربرد آن در شبکه برق ایران"، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، آبان ۱۳۷۶
- [۱۲] M.D.Ilic , L.Xiaojan and J.W. chapman , control of the Inter-area Dynamics Using FACTS Technologies in Large Electric power system proceedings of the 32<sup>nd</sup> IEEE conference on Decision and control , 15-17 Dec. 1993 , San Antonio , TX , USA , Vol.3.pp.2370-2376
- [۱۳] A.A. Edris , Enhancement of - First Swing Stability Using s High speed Phase Shifter IEEE Transactions on power systems , vol.6,No.3,Aug.1991,pp.1113-1118
- [۱۴] E.Wirth , J.Ravot , " Regulating Transformers in power systems - New concepts and Applications " , ABB Review , No.4 , 1997,pp.12-20

Transmission and Distribution Conference Vol.14 , 10-15 April 1994 , Chicago , IL,USA,pp.233-238.

, D.shirmohammadi , H.W. Wang [۲۳]

Reconfiguration of Electric " Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction ". IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 4 , No.2 , April 1989.

[۲۴] آتوسا یزدانی، گئورگ قره پتیان، شهرام منتصر

کوهساری، " کاربرد ایده سیلان توان بهینه برای

جابجایی و تنظیم ترانسفورماتورهای جابجا کننده فاز

جهت کاهش تلفات در شبکه‌های انتقال "

شانزدهمین کنفرانس بین المللی برق، مهر ۱۳۸۰،

تهران، ایران

C.Huang Feature Analysis of power [۲۵]

Flows Based on the Allocations of phase - shifting Transformers , IEEE Transactions on power system Vol.18 , No. 1, Feb.2003 , pp.266-272

[۲۶] م. فرمد، س. راعی، گ.ب. قره پتیان و ح. محسنی، "

تعیین ارزش تلفات در شبکه برق ایران بر مبنای

ترکیب سوخت مصرفی و میزان مشارکت نیروگاهها

در تولید"، نشریه علمی برق، شماره ۲۸، زمستان

۱۳۷۸.

[۲۷] سید علی نبوی نیاکی و افشین لشکرآرا " بررسی و

بهبود عملکرد جابجاگر فاز در ترکیب با یک کنترل

گر یکپارچه توان "، مجموعه مقالات دهمین

کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد چهارم، ۲۴-۲۶

اردیبهشت ۱۳۸۱