

# جایابی بهینه کنترل‌کننده‌های توان در خطوط انتقال با در نظر گرفتن پخش بار اقتصادی سیستم قدرت

مصطفی عیدانی

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بجنورد، eidiani@yahoo.com

## چکیده

از سالیان گذشته، بکارگیری کنترل‌کننده‌های توان در سیستم‌های انتقال توان، بسیار متداول گشته است و اخیراً دو عنصر جدید قدرتی به نام‌های VFT و RPFC معرفی شده‌اند که می‌توان از آنها در کنترل توان خطوط استفاده کرد. در این مقاله پس از توضیح عملکرد این دو عنصر جدید، روش جدیدی در پخش بار اقتصادی سیستم قدرت، با وجود این کنترل‌کننده‌های توان ارائه شده است. در این مقاله از ماتریس امپدانس و ادمیتانس نامتقارن استفاده شده و به روش جدیدی ماتریس تلفات و یا ضرایب B محاسبه شده است. همچنین نشان داده شده است که عدم توجه به پخش بار اقتصادی در تعیین مکان و مقدار توان کنترلی در خط، می‌تواند سیستم را از حالت بهینه خارج نماید. تحلیل‌های فوق، بر روی سیستمی ۲۶ باسه با ۶ ژنراتور، پیاده‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

## واژه‌های کلیدی

پخش بار اقتصادی، کنترل‌کننده توان در خط انتقال، ماتریس تلفات.

## ۱- مقدمه

تشکیل شده است. RPFC مزایای زیادی نسبت به UPFC دارد و می‌تواند توان را در حالت‌های مختلف کنترل نماید که لازم این کار، کنترل توان انتقالی به صورت نرم، سریع و پیوسته است که توسط RPFC به خوبی انجام می‌شود [۱] و [۲]. اولین نمونه آن در ژاپن و توسط شرکت CEPCO مورد استفاده قرار گرفت و هدف اصلی از استفاده از RPFC، متقارن کردن توان ۴ خط، از دو خط دو مداره، در دو شرایط عادی و بحرانی بود که این عمل به خوبی انجام شد. ولی تحقیقات هنوز بر روی تحلیل‌های مختلف المان جدید RPFC ادامه دارد [۱] و [۲].

ترانسفورماتور فرکانس متغیر (VFT)، یک ابزار جدید است که می‌تواند برای اتصال دو شبکه (هم‌فرکانس یا غیرهم‌فرکانس) و برای تبادل توان استفاده شود. VFT از سطح امنیت بسیار بالایی برخوردار است. اولین بار در جهان، در سال ۲۰۰۴ توسط جنرال

کنترل توان حقیقی در خطوط انتقال، یکی از آرزوهای مهم در سیستم انتقال قدرت بوده که با گسترش ادوات الکترونیک قدرت (FACTS<sup>۱</sup>)، تا حدودی برآورده شده است. با یکی از این ادوات یعنی کنترل توان انتقالی یک‌پارچه (UPFC<sup>۲</sup>)، می‌توان به طور پیوسته هم اندازه و هم زاویه ولتاژ سری را کنترل کرد. ثابت شده که UPFC قطعاً یک عنصر بسیار مناسب است ولی استفاده از آن به دلیل مسائل مالی، متداول نشده و گسترش پیدا نکرده است [۱] و [۲].

کنترل‌کننده توان انتقالی گردان (RPFC<sup>۳</sup>) و ترانسفورماتور فرکانس متغیر (VFT<sup>۴</sup>) جایگزین‌های مناسبی برای UPFC هستند و از آنجا که این ادوات، قدرتی هستند تا الکترونیکی، لذا از اقبال بیشتری در سیستم قدرت روپرو شده‌اند. RPFC از دو ترانسفورماتور سری و موازی و دو ترانسفورماتور گردان تغییردهنده فاز (RPST<sup>۵</sup>)

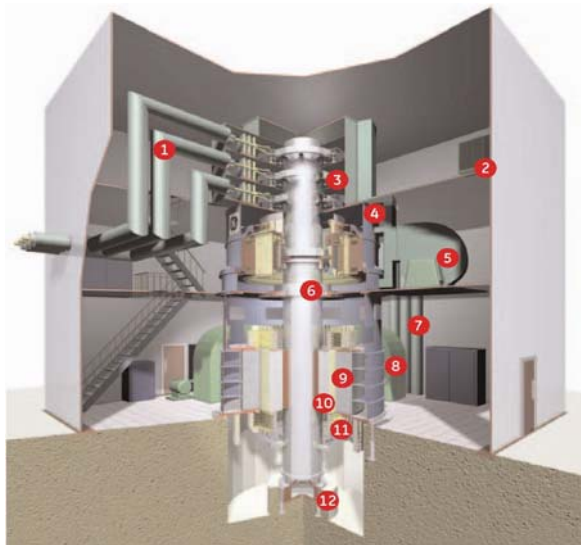
سیم‌پیچ و هسته مورق شده به‌منظور کاهش تلفات است. براساس خنک‌کننده‌های هوای عمودی کار می‌کند و ساده و قابل اطمینان است.

۲- کلکتور توان بالا، توان را از روتور به استاتور انتقال می‌دهد (مثلاً به مقدار ۱۰۰ مگاوات). کلکتور این وظیفه را توسط حلقه‌های لغزنده‌ای که از جنس کربن هستند انجام می‌دهد. سرعت پایین روتور این اجازه را به ما می‌دهد تا با افزایش قطر حلقه‌های لغزان، ایزولاسیون کافی ایجاد کنیم و این در حالی است که به‌طور همزمان می‌توانیم یک فضای قابل توجهی برای تنظیم جریان، در جاروبک‌های موازی ایجاد نماییم.

۳- موتور درایو: یک موتور DC گشتاور ثابت است که در صنعت بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل (۱)، تمام قسمت‌های VFT را نمایش می‌دهد.

- ۱: لوله‌های عبور سیم‌پیچ روتور
- ۲: محفظه هوا
- ۳: کلکتور سه فاز
- ۴: موتور DC درایو
- ۵: فن تهویه موتور DC
- ۶: یاتاقان‌های بالایی
- ۷: لوله‌های عبور سیم‌پیچ استاتور
- ۸: فن تهویه قسمت دوار
- ۹: هسته استاتور
- ۱۰: هسته روتور
- ۱۱: سیم‌پیچ‌ها و اتصالات
- ۱۲: محور و یاتاقان‌های پایینی



شکل ۱- شکل ساده یک VFT [۳]

الکترونیک به‌طور موفقیت‌آمیز در لانگلويس<sup>۶</sup> نصب و آزمایش شد و فعالیت تجاری‌اش را آغاز کرد. درواقع جنرال الکترونیک روش منحصربه‌فردی برای کم‌کردن و سبک‌کردن شبکه‌های قدرت ارائه داد. شرکت‌های برق با اختراع VFT، راه ساده‌تری نسبت به روش‌های قبلی برای کنترل توان بین شبکه‌های الکترونیک پیدا کردند [۳]. از آن زمان به بعد، پروژه‌ها و تحقیقات در زمینه VFT شروع شد [۴] - [۸] و هنوز هم ادامه دارد.

از آنجا که مطالعات انجام شده تاکنون، بیشتر تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بوده است و کمتر به بحث پخش بار اقتصادی توجه شده است لذا در مقاله حاضر سعی شده است که با وجود این ادوات، پخش بار اقتصادی انجام شده و تغییرات لازم در مدل‌سازی بیان شوند.

در بخش دوم مقاله، به‌طور خلاصه، کنترل‌کننده‌های توان انتقالی در خط توضیح داده شده‌اند. در بخش سوم، نحوه محاسبه ماتریس تلفات، با وجود کنترل‌کننده‌های توان آورده شده است. در بخش چهارم، پخش بار اقتصادی برای یک سیستم ۲۶ باسه با وجود کنترل‌کننده‌های توان در خطوط انجام شده است. در بخش پنجم، جایابی بهینه کنترل‌کننده توان بررسی شده است. بخش ششم، نتیجه‌گیری و در بخش هفتم، مراجع مقاله آورده شده است.

## ۲- مدل کنترل‌کننده‌های توان در خط انتقال

در این بخش دو کنترل‌کننده جدید توان در خطوط انتقال یعنی RPF و VFT بررسی شده‌اند.

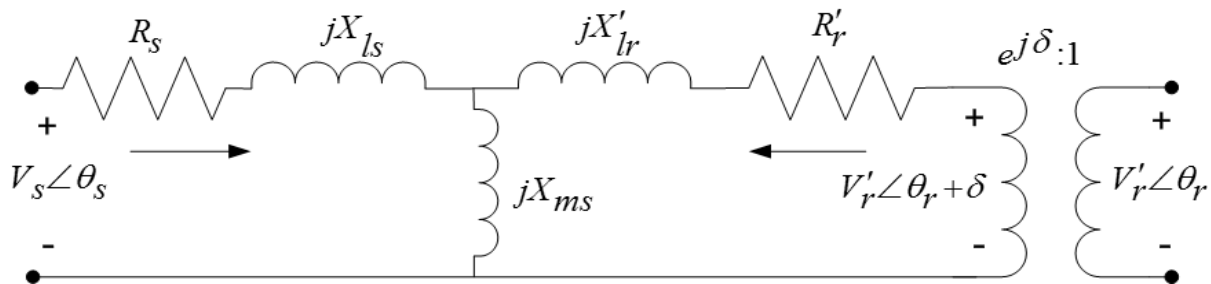
### ۲-۱- ترانسفورماتور فرکانس متغیر (VFT)

اساس و پایه VFT براساس ترکیبی از تکنولوژی هیدروژن‌رئوتورها و ترانسفورماتورها است. VFT یک ترانسفورماتور دوار است که در هر زاویه‌ای، انتقال و تغییر فاز را به‌طور پیوسته کنترل می‌کند. این کار توسط سیستم درایو و سیستم کنترل انجام می‌شود. سیستم درایو و سیستم کنترل، زاویه و سرعت ترانسفورماتور دوار را طوری تنظیم می‌کنند تا توان عبوری از VFT همیشه متعادل باشد. VFT از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده است و هرکدام از این قسمت‌ها دارای اجزایی هستند.

۱- قسمت دوار: این قسمت قلب VFT است. این ماشین دوار از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

الف- استاتور، که دارای هسته و سیم‌پیچ‌های سه فاز می‌باشد. استاتور VFT، بسیار شبیه به استاتور ماشین‌های سنکرون دوار و مانند هیدروژن‌رئوتورها است.

ب- روتور، که اجزای آن شبیه استاتور است شامل میله‌های



شکل ۲- مدار یک فاز از VFT [۳]

با اختلاف فرکانس بین دو شبکه قدرت است. پخش بار در طی این عمل حفظ می‌شود. صرفنظر از پخش توان، روتور به‌طور ذاتی خودش را با تعقیب کردن اختلاف فاز تحمیل شده توسط دو سیستم غیر هم فرکانس، هماهنگ می‌کند.

سیستم‌های قدرت، در معرض اغتشاشات مختلفی هستند که این باعث انحراف در فرکانس و ولتاژ می‌شود. برای حفظ یک توان انتقالی ثابت، سیستم کنترل VFT باید دائماً با حفظ موقعیت نسبی روتور نسبت به استاتور، انحراف فرکانس بین دو شبکه متصل به استاتور و روتور را جبران کند. با ایجاد یک حلقه بسته تعدیل توان، می‌توان توان انتقالی را برابر با مقداری که اپراتور تعیین کرده، حفظ کرد. تعدیل کننده، توان اندازه‌گیری شده را با توان مرجع مقایسه می‌کند سپس گشتاور موتور را که تابعی از اختلاف این دو توان است تنظیم می‌کند. برای اطمینان از رفتار مناسب VFT در شرایط عملکرد عادی سیستم و توانایی کافی در هنگام وقوع وقایع مختلف در سیستم، مشخصات VFT برای یک محدوده وسیعی از شرایط سیستم طراحی شده است.

## ۲-۱-۱- مزیت‌ها و عیب‌های VFT نسبت به دیگر تکنولوژی‌های

### مشابه

#### مزیت‌ها [۳] - [۸]

۱- پیچیدگی کمتر و نگهداری کمتر، به‌خاطر طراحی ساده اجزای VFT، که براساس طراحی ماشین‌های دوار مرسوم است. VFT بسیار پر کاربرد است و نیاز به دوره‌های نگهداری بسیار طولانی ندارند.

۲- VFT یک مسیر ساده و کنترل‌شده‌ای بین شبکه‌های الکتریکی ایجاد می‌کند به‌طوری که توان انتقالی می‌تواند بین شبکه‌ها تغییر کند. این امر قبلاً به‌خاطر قیدهای فنی مانند غیرهم‌فرکانسی یا ازدحام سیستم‌ها قابل پیاده‌سازی نبود.

۳- جایگاه VFT نیاز به فضای کمتری در مقایسه با تکنولوژی‌های

تکنولوژی اصلی VFT در واقع به قسمت دوار آن و سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور و روتور آن مربوط می‌شود. کلکتور سه فاز، جریان را بین سیم‌پیچ‌های سه فاز روتور و استاتور هدایت می‌کند. دو شبکه الکتریکی هرکدام به‌صورت مجزا به استاتور و روتور متصل می‌شوند و توان الکتریکی بین دو شبکه، توسط کوپل مغناطیسی از طریق فاصله هوایی تغییر می‌کند و برای اعمال گشتاور به روتور ترانسفورماتور، از موتور درایو و سیستم درایو با سرعت متغیر استفاده می‌شود تا موقعیت چرخش روتور نسبت به استاتور تنظیم شود؛ در نتیجه دامنه و جهت توان عبوری از VFT کنترل می‌شود.

شکل مداری برای یک فاز از VFT در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مدار نیز مانند بقیه مدارهای قدرت AC، متناسب با اختلاف فاز بین زاویه روتور و استاتور، توان حقیقی از قسمت دوار عبور می‌کند. امیدانس قسمت دوار و شبکه AC، اندازه تغییر فاز مورد نیاز برای توان انتقالی را تعیین می‌کند. توان راکتیو عبوری از VFT، توسط امیدانس سری قسمت دوار و اختلاف دامنه ولتاژها در دو طرف VFT تعیین می‌شود. توان انتقال یافته از طریق قسمت دوار، تابعی از گشتاور اعمال شده به روتور می‌باشد. هنگامی که سیستم‌ها هم فرکانس باشند؛ روتور ساکن می‌ماند به‌طوری که ولتاژ استاتور و روتور با یکدیگر هم فاز هستند. به‌منظور اینکه توان از یک سیستم به سیستم دیگر انتقال یابد باید روتور نسبت به محل اولیه‌اش تغییر مکان داده شود. اگر گشتاورهای اعمال شده در یک جهت باشند؛ توان از سیم‌پیچ‌های استاتور به سیم‌پیچ‌های روتور جاری می‌شود و اگر گشتاورهای اعمالی در جهت مخالف باشند؛ توان از سیم‌پیچ‌های روتور به سیم‌پیچ‌های استاتور انتقال می‌یابد. توان جاری شده متناسب با دامنه و جهت گشتاور اعمالی است. سیستم درایو و موتور، به‌طور پیوسته گشتاور مورد نیاز را تولید می‌کنند. اگر هیچ گشتاوری اعمال نشود هیچ توانی از طریق قسمت دوار منتقل نمی‌شود. هنگامی که دو سیستم هم فرکانس نیستند؛ روتور VFT، به‌طور پیوسته می‌چرخد و سرعت چرخش متناسب

۱۸- جایگزین مناسبی برای HVDC است.  
۱۹- قابلیت انتقال توان را در فرکانس های مختلف دارد.  
۲۰- برای پخش توان حقیقی کنترل بهتری ارائه می دهد.  
۲۱- VFT در سیستم های قدرت مرسوم قابل استفاده است و نیاز به الکترونیک خاصی ندارد. تکنولوژی VFT ماندگار است و قابل استفاده در بازارهای توزیع و انتقال است در حالی که HVDC نیاز به الکترونیک و سیستم کنترلی خاصی دارد و هرروزه دستخوش تغییر هستند.  
۲۲- در شبکه های قدرت واقعی با موفقیت بکارگیری شده است.  
۲۳- VFT ثابت کرده است که از HVDC برای اتصال شبکه های قدرت غیرهم فرکانس مناسب تر است و جایگزینی مناسبی برای ترانسفورماتورهای تغییردهنده فاز می باشد.

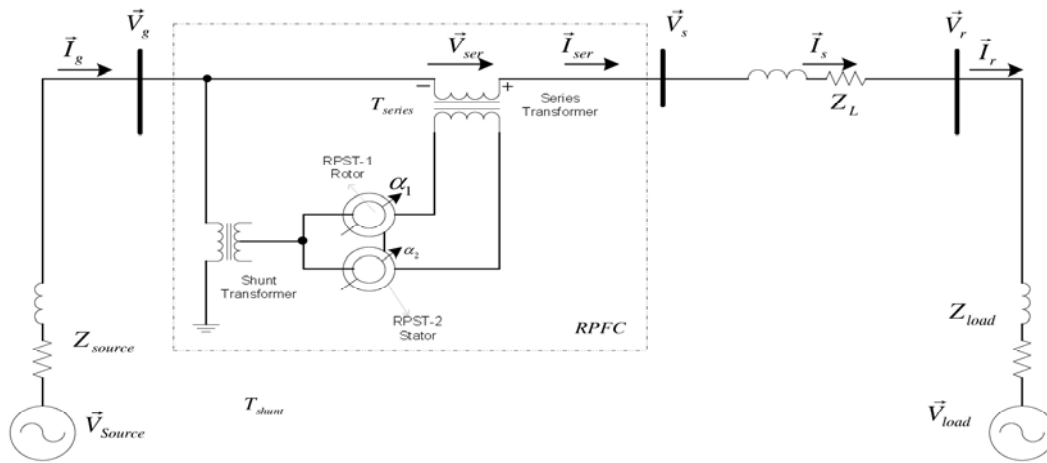
#### عیبها [۳] - [۸]

۱- داشتن محدودیت در ماکزیمم توان انتقالی  
۲- تلفات بیشتر در توان راکتیو  
۳- در محدوده ولتاژ پایین کار می کند لذا نیاز به ترانسفورماتورهای افزایشنده و کاهشنده دارد.

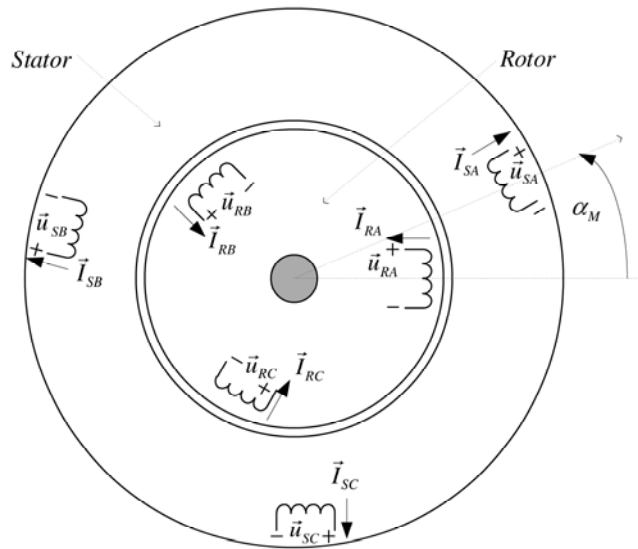
#### ۲-۲- کنترل کننده توان انتقالی گردان (RPFC)

نمایی از یک RPFC که شامل دو ترانسفورماتور معمولی سری و موازی و دو ترانسفورماتور گردان تغییر دهنده فاز (RPST) می باشد در شکل (۳) نشان داده شده است [۱] و [۲].  
اجزای اصلی یک RPFC، همان ترانسفورماتورهای گردان تغییردهنده فاز (RPST) هستند که با تغییر زاویه بین میدان استاتور و روتور، توان انتقالی را تغییر می دهند. ارتباط بین ولتاژ و جریان سیم پیچی های استاتور و روتور مانند شکل (۴)، با زاویه  $\alpha$  مشخص می شود.  
با توجه به تحلیل های انجام شده [۱] و [۲]، مدار معادل یک فاز برای انتقال توان و تحلیل استاتیکی به صورت شکل (۵) خلاصه می شود.  
مزیتها و عیبهای RPFC نسبت به HVDC بسیار شبیه VFT است ولی موضوعی که در این مقاله مهم است شباهت مدار معادل دو نوع کنترل کننده در پخش بار است که در بخش بعدی خلاصه می شود.

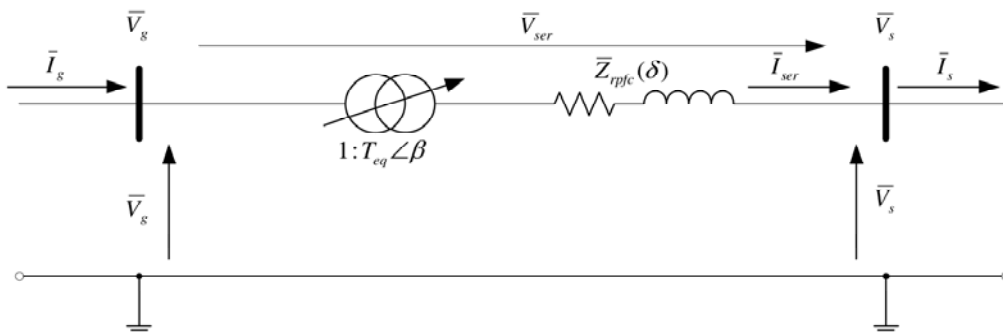
مشابه دارد. به عنوان مثال، یک ایستگاه ۱۰۰ مگاواتی VFT، حدوداً یک فضای ۳۰ متر در ۸۰ متر را اشغال می کند ولی یک HVDC مشابه، نوعاً ۲ تا ۳ برابر این فضا را اشغال می کنند.  
۴- در مقایسه با دیگر تجهیزات الکترونیک قدرت مشابه، VFT هارمونیک کمتری تولید می کند و تعامل نامطلوبی با ژنراتورهای مجاور یا دیگر تجهیزات شبکه به وجود نمی آورد.  
۵- در مقایسه با HVDC، مزیت اولیه VFT، هزینه پایین تر، مشخصه فنی کاربردی بهتر و طراحی با ماشین های الکتریکی مرسوم است که اکثراً با عملکرد و نگهداری آنها آشنا هستند.  
۶- عملکرد VFT نشان داده است که این تکنولوژی جدید، یک روش مؤثر برای انتقال توان بین سیستم های غیرهم فرکانس است.  
۷- همانند HVDC، VFT یک ایزولاسیون بین شبکه ها ایجاد می کند.  
۸- برخلاف HVDC، VFT با پاسخ آنی به اتصالات AC، برای وقایع سریع، پایداری شبکه را بهبود می بخشد. این خصوصیت ذاتی برای اتصال یک شبکه ضعیف، جهت افزایش پایداری، یک ویژگی فوق العاده گران بها است. براساس توانایی VFT، سرعت پاسخ آن به یک خطا به اندازه کافی بالا است تا از مسائل پایداری که بعد از، از دست دادن تجهیزات موازی رخ می دهد پیشگیری کند.  
۹- VFT در طی این سالها، با عملکرد خوب خود ثابت کرده است که می تواند به توان انتقالی مورد نیاز، پشتیبانی شرایط حین خطا و کنترل شبکه پاسخ های مناسبی بدهد و برنامه پخش توان را در طی زمان وقوع اغتشاش حفظ کند.  
۱۰- سرعت پایین روتور VFT باعث می شود که نیاز به نگهداری کمی داشته باشد.  
۱۱- همه اجزای اصلی VFT، دارای استرس عملکردی پایینی هستند که این امر باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می شود.  
۱۲- VFT می تواند توان راکتیو مصرف کند حتی هنگامی که بدون بار است.  
۱۳- بانک های خازنی می توانند VFT را به گونه ای تغییر دهند تا در ضریب قدرت واحد کار کند.  
۱۴- باز شدن زاویه فاز، در هنگام مصرف توان راکتیو انجام شده و این کار در حالت دینامیکی انجام می شود.  
۱۵- تنظیمات مرجع را می توان به طور پیوسته تغییر داد.  
۱۶- VFT به فرآیندهای پایداری، پاسخ مناسبی می دهد.  
۱۷- مدل ساده ای در سیستم قدرت دارد.



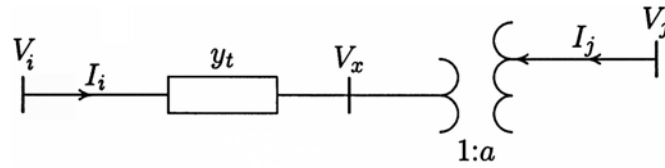
شکل ۳- نمایی از یک RPFC [۱]-[۲]



شکل ۴- سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور در یک RPST [۱]-[۲]



شکل ۵- نمایی از مدار معادل یک فاز RPFC [۱] و [۲]



شکل ۶- ترانسفورماتور با تپ مختلط  $\alpha$  [۹]

### ۲-۳- مدار معادل خلاصه شده برای پخش بار اقتصادی

مدار معادلی که برای کنترل‌کننده‌های توان در خط استفاده می‌شود شبیه مدار معادل ترانسفورماتور، با تپ متغیر و مختلط است که در شکل (۶) نشان داده شده است. به همین دلیل در این مقاله، به تمام این کنترل‌کننده‌ها  $PFC^7$  گفته می‌شود.

ماتریس ادمیتانس شکل (۶) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_i \\ \hat{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_t & -\frac{y_t}{\alpha} \\ -\frac{y_t}{\alpha^*} & \frac{y_t}{|\alpha|^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_i \\ \hat{V}_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $\alpha$  در ترانسفورماتور تغییردهنده تپ،  $e^{j\beta}$  در RPF و  $e^{j\delta}$  در VFT، اعداد مختلطی هستند که ولتاژ و جریان دو طرف ترانس را ربط می‌دهند. دقت شود که ماتریس ادمیتانس بدست آمده نامتقارن است و اگر در یک سیستم، فقط یک خط دارای این نوع ترانسفورماتور باشد ماتریس ادمیتانس و امپدانس کل سیستم نیز نامتقارن می‌شود. در بخش بعدی، اثر این نامتقارنی در محاسبه ماتریس تلفات نشان داده شده است.

### ۳- محاسبه ماتریس تلفات با وجود کنترل‌کننده توان در خط انتقال

در این بخش، رابطه تلفات در سیستم نامتقارن ناشی از کنترل‌کننده توان در خط انتقال بررسی می‌شود و با آنکه برای رابطه تلفات، روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۰]-[۱۲] ولی هنوز رابطه معروف کرون و ضرایب B، فراوان استفاده می‌شود. لذا در این مقاله نیز از همین رابطه برای هدف مورد نظر استفاده شده است. رابطه تلفات کرون به صورت زیر مشخص شده است:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} P_{gi} B_{ij} P_{gj} + \sum_{i=1}^{n_g} B_{0i} P_{gi} + B_{00} \quad (2)$$

که  $n_g$  تعداد کل ژنراتورها است. کل توان مختلط تزریقی به باس  $i$  را با  $S_i$  نمایش داده و داریم:

$$S_i = P_i + jQ_i = \hat{V}_i \hat{I}_i^* \quad (3)$$

با جمع کل توان‌های تزریقی به تمام باس‌ها، می‌توان تلفات کل سیستم را به صورت زیر بدست آورد:

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n \hat{V}_i \hat{I}_i^* = V_{bus}^T I_{bus}^* \quad (4)$$

که  $P_L$  و  $Q_L$ ، کل توان حقیقی و موهومی تلف شده در سیستم و  $n$  تعداد کل باس‌ها است.  $V_{bus}$  و  $I_{bus}$  نیز بردارهای ستونی ولتاژ و جریان تزریقی به باس‌ها می‌باشند. حال با فرض معلوم بودن ماتریس ادمیتانس داریم:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \Rightarrow V_{bus} = (Y_{bus})^{-1} I_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (5)$$

$Z_{bus}$  ماتریس امپدانس است و با استفاده از آن، رابطه تلفات به صورت زیر در می‌آید:

$$P_L + jQ_L = [Z_{bus} I_{bus}]^T I_{bus}^* = I_{bus}^T Z_{bus}^T I_{bus}^* \quad (6)$$

دقت شود که در اینجا  $Z_{bus}^T \neq Z_{bus}$  و  $I_{bus}^T R_{bus} I_{bus}^* \neq P_L$  و داریم:

$$P_L = Real(I_{bus}^T Z_{bus}^T I_{bus}^*) \quad (7)$$

حال اگر فرض کنیم برای سادگی، باس‌های ۱ تا  $n_g$ ، باس‌های ژنراتور و باس‌های  $n_g + 1$  تا  $n$  (به تعداد  $n_d$ ) باس‌های بار باشند؛ آنگاه تعریف می‌کنیم:

$$I_{bus} = [I_g | I_L]^T = [\hat{I}_1 \dots \hat{I}_{n_g} | \hat{I}_{n_g+1} \dots \hat{I}_n]^T \quad (8)$$

جمع جریان تزریقی به باس‌های بار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{I}_D = \sum_{i=1}^{n_d} \hat{I}_{Li} \quad (9)$$

حال ضریب  $I_k$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$I_k = \frac{\hat{I}_{Lk}}{\hat{I}_D} \quad k = 1, \dots, n_d \quad (10)$$

اگر باس ۱ باس مرجع باشد آنگاه داریم:

$$\hat{V}_1 = \sum_{i=1}^n Z_{1i} \hat{I}_i = \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} \hat{I}_{gi} + \sum_{i=1}^{n_d} Z_{1i+n_g} \hat{I}_{Li} \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} \hat{I}_{gi} + \sum_{i=1}^{n_d} Z_{1i+n_g} I_i \hat{I}_D$$

که ماتریس  $H$  را ماتریس هرمیشین<sup>۱</sup> می نامند. ماتریس  $H$  نامتقارن است ولی به راحتی ثابت می شود که با متقارن کردن آن، تأثیری در نتیجه تلفات ندارد ولی نمی توان از  $Z_{bus} = Z_{bus}^T$  استفاده کرد. به عبارت دیگر، ماتریس  $Real(H)$  نامتقارن است و اگر ماتریس  $BB$  را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$BB \triangleq Real(H) \quad (22)$$

می توان آن را به صورت زیر متقارن کرد:

$$BBS = 0.5(BB + BB^T) \quad (23)$$

آنگاه به راحتی ثابت می شود که دو رابطه زیر برابرند:

$$P_L = P_{INJ}^T . BB . P_{INJ} = P_{INJ}^T . BBS . P_{INJ} \quad (24)$$

حال می توان به صورت زیر ماتریس های تلفات  $B$  را بدست آورد:

$$Real(H) = 0.5(H + H^*) \quad (25)$$

$$HS = 0.5(Real(H) + (Real(H))^T)$$

و داریم:

$$HS = \begin{bmatrix} B_{11} & \dots & B_{1n_g} & \frac{B_{01}}{2} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & \dots & B_{n_g n_g} & \frac{B_{0n_g}}{2} \\ \frac{B_{01}}{2} & \dots & \frac{B_{0n_g}}{2} & B_{00} \end{bmatrix} \quad (26)$$

و پس از خلاصه سازی داریم:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{n_g} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (27)$$

ولی هدف اصلی، تعیین تلفات برحسب توان های تولیدی ژنراتور یعنی  $P_{gi}$  ها است. با قرار دادن  $P_i = P_{gi} - P_{di}$  و با فرض معلوم بودن  $P_{di}$  ها، رابطه تلفات به صورت زیر خلاصه می شود:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} P_{gi} B_{ij} P_{gj} + \sum_{i=1}^{n_g} B_{0i}^{new} P_{gi} + B_{00}^{new} \quad (28)$$

که:

$$B_{0i}^{new} = B_{0i} - 2 \sum_{j=1}^{n_g} P_{di} . B_{ij} \quad (29)$$

$$B_{00}^{new} = B_{00} - \sum_{i=1}^{n_g} B_{0i} P_{di} + \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} P_{di} B_{ij} P_{dj}$$

حال با استفاده از ماتریس تلفات جدید، می توان پخش بار اقتصادی را با حضور کنترل کننده های توان و یا هر علت دیگری که باعث نامتقارنی ماتریس های  $Z_{bus}$  و  $Y_{bus}$  شدند؛ محاسبه کرد.

$$= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{li} \hat{I}_{gi} + \hat{I}_D T$$

که:

$$T = \sum_{i=1}^{n_d} Z_{li+n_g} . I_i \quad (12)$$

حال با تعریف دو متغیر جدید، می توان  $\hat{I}_{Lk}$  را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\hat{I}_0 \triangleq -\frac{V_1}{Z_{11}}, \quad \rho_k = -\frac{I_k}{T} \quad (13)$$

$$\hat{I}_{Lk} = \rho_k \sum_{i=1}^{n_g} Z_{li} \hat{I}_{gi} + \rho_k . Z_{11} \hat{I}_0$$

و به صورت ماتریسی می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_{bus} = C . I_{new} \quad (14)$$

که:

$$I_{new} = [\hat{I}_{g1} \dots \hat{I}_{gn_g} \hat{I}_0]^T \quad (15)$$

با قرار دادن رابطه (۱۴) در رابطه (۷) داریم:

$$P_L = Real(I_{new}^T . C^T . Z_{bus}^T . C^* . I_{new}^*) \quad (16)$$

حال با داشتن توان های تولیدی مختلط در باس  $i$  می توان نوشت:

$$\hat{I}_{gi} = \frac{S_i^*}{\hat{V}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i^*} = \frac{1-j}{\hat{V}_i^*} \frac{Q_i}{P_i} P_i \triangleq \psi_i . P_i \quad (17)$$

در نتیجه می توان  $I_{new}$  در رابطه (۱۵) را برحسب توان های تزریقی در باس های ژنراتور، به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{g1} \\ \vdots \\ \hat{I}_{gn_g} \\ \hat{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 & \dots & 0 & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ 0 & & \psi_{n_g} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \hat{I}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{n_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

و یا به صورت خلاصه ماتریسی:

$$I_{new} = \Psi . P_{INJ} \quad (19)$$

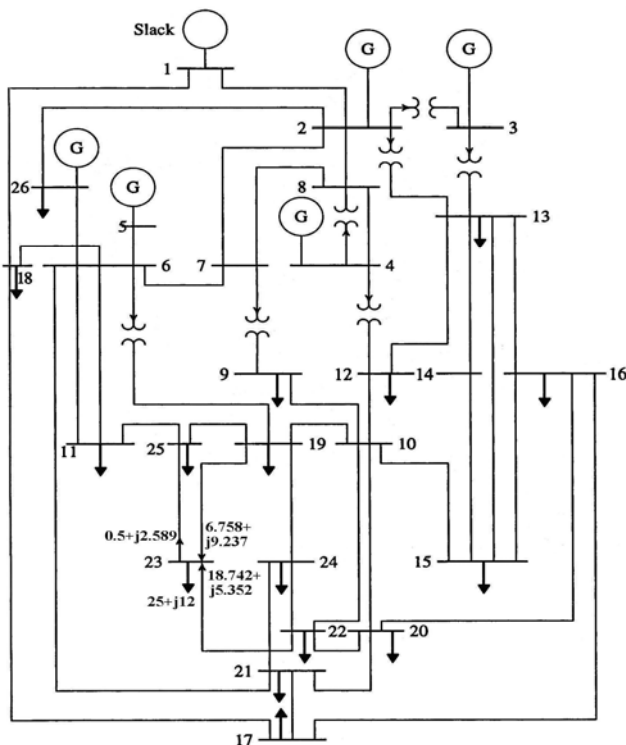
دقت شود که  $\hat{I}_{gi}$  ها، جریان های تزریقی به باس های ژنراتور و  $P_i$  ها توان های تزریقی به باس های ژنراتور می باشند و اگر  $P_{di}$  توان بار در باس  $i$  باشد داریم:

$$P_i = P_{gi} - P_{di}, \quad i = 1, \dots, n_g \quad (20)$$

حال با قرار دادن رابطه (۱۹) در رابطه (۱۶) داریم:

$$P_L = Real(P_{INJ}^T . \Psi^T . C^T . Z_{bus}^T . C^* . \Psi^* . P_{INJ}) = P_{INJ}^T Real(H) . P_{INJ} \quad (21)$$

نامتقارن) تقریباً یکسان شده است و ربطی به مکان PFC در شبکه ندارد. ثانیاً در بیشتر وقتها، روش قدیمی (استفاده از  $Z_{bus}$  متقارن) واگرا می شود. ثالثاً با آنکه در بعضی وقتها، روش قدیمی ظاهراً به نقطه بهتری رسیده بود (مثلاً در خط ۲۳-۲۵) ولی به دلیل غلط بودن مقدار تلفات و عدم تساوی تلفات در پخش بار و ماتریس تلفات، جواب بدست آمده واقعی نبوده و جواب واقعی، همان هزینه بیشتر بدست آمده از روش  $Z_{bus}$  نامتقارن است.



شکل ۷- سیستم ۲۶ باسه در نرم افزار MATLAB [۹] برای تحلیل

#### پخش بار اقتصادی در حضور PFC

شبیه سازی دیگری که در این مقاله انجام شده است بررسی تغییر توان انتقالی خطوط با VFT، با در نظر گرفتن پخش بار اقتصادی است. سیستم شکل (۷) را دوباره در نظر بگیرید.

ابتدا با تغییر توان VFT در بین باس های ۷ و ۹ به بهترین حالت در پخش بار اقتصادی می رسیم در این حالت، کل هزینه: \$/h ۱۵۴۲۹/۳۲، کل تلفات: ۱۱/۴۴۵۷ مگاوات و توان انتقالی از VFT، ۸۷/۴۱۴ مگاوات شده است. با تغییر زاویه  $\delta$  در VFT، توان انتقالی کمتر و بیشتر از حالت بهینه می شود. در هر حالت پس از پخش بار بهینه، کل هزینه و کل تلفات سیستم را بدست می آوریم. نتایج این بررسی در شکل (۸) نشان داده شده است.

نکته آخر اینکه نمی توان از ماتریس های  $Z_{bus}$  و  $Y_{bus}$  متقارن در سیستم نامتقارن استفاده کرد ولی پس از محاسبه ماتریس های تلفات، می توان آنها را متقارن کرد.

#### ۴- پخش بار اقتصادی با وجود کنترل کننده توان در خط انتقال

در این بخش، پخش بار اقتصادی یک سیستم ۲۶ باسه از مرجع [۹]، با حضور یک کنترل کننده توان حقیقی در خط انجام شده است. ژنراتورهای این سیستم دارای توابع هزینه و محدودیت های زیر هستند:

جدول ۱- اطلاعات ژنراتورهای سیستم ۲۶ باسه [۹]

محدودیت	تابع هزینه
$100 \leq P_1 \leq 500$	$C_1 = 240 + 7.0P_1 + 0.0070P_1^2$
$50 \leq P_2 \leq 200$	$C_2 = 200 + 10.0P_2 + 0.0095P_2^2$
$80 \leq P_3 \leq 300$	$C_3 = 220 + 8.5P_3 + 0.0090P_3^2$
$50 \leq P_4 \leq 150$	$C_4 = 200 + 11.0P_4 + 0.0090P_4^2$
$50 \leq P_5 \leq 200$	$C_5 = 220 + 10.5P_5 + 0.0080P_5^2$
$50 \leq P_{26} \leq 120$	$C_{26} = 190 + 12.0P_{26} + 0.0077P_{26}^2$

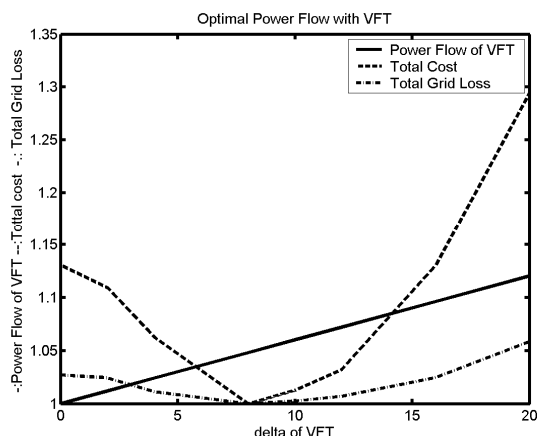
ابتدا با قراردادن کنترل کننده های توان با زاویه ثابت در خط های مختلف، تلفات سیستم با استفاده از پخش بار و ماتریس تلفات، با دو روش محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. سپس پخش بار اقتصادی به روش گرادیان انجام شده و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. تمام محاسبات با نرم افزار MATLAB انجام شده است.

از جدول (۲) که مقایسه تلفات را نشان می دهد نتیجه می شود که در روش جدیدی که از  $Z_{bus}$  نامتقارن استفاده شده است با وجود کنترل کننده توان (PFC) در خط، تلفات از پخش بار و تلفات از رابطه ماتریس تلفات یکی بدست آمده است (با همان تقریب ۴ رقم اعشار) ولی در روش قدیمی که از  $Z_{bus}$  متقارن استفاده شده است مقدار تلفات کمتر و یا بیشتر از مقدار واقعی شده است و مقدار بدست آمده از دو برنامه پخش بار و ماتریس تلفات نیز یکی نیست و نمی توان به آن اعتماد کرد.

از جدول (۳) که مقایسه کل هزینه، حداکثر خطا و تعداد تکرار الگوریتم پخش بار اقتصادی را با دو روش نشان می دهد؛ نتایج جالبی بدست آمده است.

اولاً حداکثر خطا و تعداد تکرار روش جدید (استفاده از  $Z_{bus}$





شکل ۸- توان انتقالی از VFT، کل هزینه تولید و تلفات کل سیستم در هنگام تغییر زاویه VFT (هنجار شده)

از شکل (۸) دیده می‌شود لزوماً کم کردن و یا زیاد کردن توان در یک مسیر (مانند مسیر بین باس ۷ و ۹) باعث کاهش تلفات و یا کاهش هزینه‌ها نمی‌شود بلکه در هر مسیر یک مقدار توان وجود دارد که در بین پخش بارهای بهینه، بهتر است یعنی کمترین هزینه تولید را داراست.

برای درک بهتر این موضوع، در نقطه کار بهینه، کمترین توان انتقالی، از خط بین باس ۲۳ و ۲۵ عبور کرده و مقدار آن ۰/۵ مگاوات شده است. تصور می‌شود که اگر بتوان این توان را افزایش داد شبکه به نقطه بهتری خواهد رسید. حال با قرار دادن یک VFT در خط ۲۳-۲۵، توان انتقالی را از ۰/۵ مگاوات به ۲/۵۸۵ مگاوات می‌رسانیم. در این حالت کل هزینه به مقدار  $15431/83 \text{ \$/h}$  و کل تلفات به مقدار  $11/6283$  مگاوات افزایش می‌یابد. حال اگر جهت توان را تغییر داده و به مقدار  $2/742$ - مگاوات برسانیم آنگاه کل هزینه به مقدار  $15434/76 \text{ \$/h}$  و کل تلفات به مقدار  $11/8143$  مگاوات افزایش می‌یابد.

با این مثال ساده دیده می‌شود که اگر لزوماً با دیدن خطوط کم بار، بخواهیم توان انتقالی در آن خط را افزایش دهیم (در هر جهت) حتماً به جواب بهتری نمی‌رسیم و در واقع برای تعیین مکان بهینه VFT، باید علاوه بر تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، پخش بار بهینه را نیز مد نظر قرار داد.

### ۵- جایابی بهینه کنترل‌کننده توان

در این بخش از مقاله با استفاده از تحلیل حساسیت، مکان بهینه و مقدار توان انتقالی بهینه توسط کنترل‌کننده توان، در سیستم شکل (۷) بدست آمده است. تمام محاسبات با نرم‌افزار

جدول ۲- مقایسه تلفات (بر حسب مگاوات) در حالت‌های مختلف

سیستم ۲۶ باسه در حضور کنترل‌کننده توان

تلفات در روش قدیمی با Zbus متقارن		تلفات در روش جدید با Zbus نامتقارن		در PFC خط
ماتریس تلفات	پخش بار	ماتریس تلفات	پخش بار	
۱۴/۷۳۷۷	۱۴/۷۳۳۴	۱۴/۷۳۳۴	۱۴/۷۳۳۴	بدون
۱۳/۷۰۷۲	۱۳/۳۱۶۳	۱۴/۶۰۴۴	۱۴/۶۰۴۴	۹-۷
۱۴/۴۹۲۶	۱۴/۴۸۸۷	۱۴/۸۶۰۵	۱۴/۸۶۰۵	۲۳-۲۵
۱۵/۰۷۰۹	۱۵/۰۶۱۵	۱۴/۸۵۰۹	۱۴/۸۵۰۹	۲۴-۲۲
۱۵/۰۰۰۲	۱۴/۹۸۱۲	۱۴/۷۷۱۵	۱۴/۷۷۱۵	۲۳-۲۲
۱۵/۰۶۱۱	۱۵/۰۹۰۶	۱۴/۷۰۵۵	۱۴/۷۰۵۵	۲۴-۱۹
۱۴/۶۹۵۷	۱۴/۶۸۷۹	۱۴/۷۵۵۴	۱۴/۷۵۵۴	۲۱-۱۷
۱۴/۹۳۰۰	۱۴/۹۳۰۵	۱۴/۶۴۸۵	۱۴/۶۴۸۵	۱۷-۱۶
۱۶/۵۵۲۱	۱۶/۵۴۷۲	۱۴/۷۵۲۹	۱۴/۷۵۲۹	۱۶-۱۳
۱۴/۰۴۷۰	۱۴/۰۸۷۰	۱۵/۳۵۰۵	۱۵/۳۵۰۵	۱۵-۱۲
۱۲/۵۲۲۰	۱۲/۵۵۵۳	۱۴/۷۶۶۰	۱۴/۷۶۶۰	۲۶-۱۱
۱۴/۸۱۶۵	۱۴/۷۷۴۲	۱۴/۸۸۱۱	۱۴/۸۸۱۱	۱۹-۱۰

جدول ۳- مقایسه کل هزینه (بر حسب مگاوات)، حداکثر خطا، و

تعداد تکرار در حالت‌های مختلف سیستم ۲۶ باسه در حضور

کنترل‌کننده توان

روش قبلی Zbus متقارن			روش جدید Zbus نامتقارن			در PFC خط
تعداد تکرار	حداکثر خطا	کل هزینه	تعداد تکرار	حداکثر خطا	کل هزینه	
۵	۰/۰۰۱	۱۵۴۳۴	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۳۳	بدون
۲۰	۰/۰۰۳۸	۱۵۷۴۱	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۵۵	۹-۷
۴	۰/۰۰۱	۱۵۴۳۱	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۴۴	۲۳-۲۵
۴	۰/۰۰۰۷	۱۵۴۳۴	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۴۵	۲۴-۲۲
۲۰	۰/۰۰۰۲	۱۵۴۳۷	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۳۹	۱۹-۶
۲۰	۰/۰۰۲۳	۱۵۴۱۲	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۶۲	۱۸-۶
۴	۰/۰۰۰۴	۱۵۴۷۶	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۴۲	۱۰-۹
۲۰	۰/۰۰۱۶	۱۵۳۹۰	۵	۰/۰۰۰۷	۱۵۴۹۲	۲۳-۲۲
۲۰	۰/۰۰۱۴	۱۵۵۶۱	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۵۵۵	۷-۶
۴	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۳۳	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۴۹	۲۵-۱۱
۴	۰/۰۰۰۶	۱۵۴۷۴	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۴۸	۲۰-۱۰
۵	۰/۰۰۰۴	۱۵۴۶۷	۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۴۳۴	۲۲-۲۰

موارد جدول (۳)، هزینه کل افزایش می‌یابد و در واقع برای کنترل توان در خط، باید علاوه بر اهداف خاص کنترلی، هزینه کل نیز مدنظر قرار بگیرد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بحث جدیدی در ارتباط با پخش بار اقتصادی سیستم قدرت در حضور کنترل‌کننده توان در خط انتقال پرداخته شده است و نشان داده شد که به‌دلیل حضور این کنترل‌کننده، ماتریس امپدانس و ادمیتانس نامتقارن می‌شود و این نامتقارنی، تأثیر زیادی در ماتریس تلفات و در نتیجه در پاسخ پخش بار اقتصادی دارد. همچنین نشان داده شد که در تعیین مکان بهینه و مقدار توان کنترلی PFC، حتماً باید به پخش بار اقتصادی اهمیت داد و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی برای بلندمدت کافی نیست و ممکن است سیستم را از حالت بهینه خارج نماید. همچنین دیده می‌شود که کاهش تلفات هدف نیست بلکه کاهش هزینه‌های کل هدف واقعی است.

## ۷- مراجع

- [1] A. Oury Ba, T. Peng, S. Lefebvre; "Rotary Power flow Controller for Dynamic Performance-Part I: RPFC Modeling", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1406-1416, July 2009.
- [2] A. Oury Ba, T. Peng, S. Lefebvre; "Rotary Power Flow Controller for Dynamic Performance-Part II: RPFC Application in Transmission Corridor", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1417-1425, July 2009.
- [3] [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/transformers\\_vft/en/variable\\_frequency.htm](http://www.gepower.com/prod_serv/products/transformers_vft/en/variable_frequency.htm)
- [4] P. Marken, J. Roedel, D. Nadeau, D. Wallace, H. Mongeau; "VFT Maintenance and Operating Performance", Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp.1 - 5, 20-24 July 2008.
- [5] P. Hassink, P.E. Marken, R. O'Keefe, G.R. Trevino; "Improving Power System Dynamic Performance in Laredo, TX", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES, pp.1 - 5, 21-24 April 2008.
- [6] H. Elahi, S. Venkataraman, E. Larsen, K. Schreder, J. Marczewski; "The Linden Variable Frequency Transformer

MATLAB انجام شده است. نکات اصلی در این بخش، استفاده از ماتریس تلفات جدید، پخش بار اقتصادی به روش گرادیان و استفاده از حساسیت پخش بار اقتصادی به تغییرات توان در خطوط انتقال می‌باشند. اگر با تغییر زاویه  $\delta$  در کنترل‌کننده توان، هزینه کل سیستم کاهش یافت دوباره زاویه تغییر می‌کند. اینکار تا زمان تعیین نقطه بهینه ادامه می‌یابد. از آنجا که در بسیاری از خطوط، تغییر توان انتقالی اقتصادی نیست لذا الگوریتم سرعت زیادی دارد. در واقع با تغییر یک واحد توان در دو جهت مستقیم و معکوس در تمام خطوط انتقال، هزینه کل محاسبه می‌شود و در صورت عدم کاهش هزینه، خط بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دقت شود که پخش بار اقتصادی به روش گرادیان، همان راه حل معمول پخش بار اقتصادی است و با وجود کنترل‌کننده‌های توان تغییر نمی‌کند فقط ماتریس تلفات و ضرایب B در آن تغییر کرده‌اند.

نتیجه نهایی در جدول (۴) آورده شده است. از آنجا که مسئله کنترل‌کننده‌های توان در خط و تعیین مکان بهینه آن در سیستم یک مساله جدید است لذا با هیچ روش دیگری غیر از روش دقیق و به‌صورت دستی مقایسه نشده است. پس از مقایسه تمام حالت‌ها، همین نتایج جدول (۴) بدست آمده است. زمان محاسبات با کامپیوتری با مشخصات پردازنده ۱۶۰۰ مگاهرتز و حافظه یک گیگا بایت، حدود ۱/۸۸ ثانیه شده است.

جدول ۴- نتیجه نهایی مکان و مقدار توان انتقالی بهینه سیستم  
شکل (۷)

عنوان	قبل از اضافه شدن PFC- ولی اقتصادی	بعد از اضافه شدن PFC- (نقطه بهینه)
مکان PFC	?	۱۹-۶
توان انتقالی از خط	۸۴/۸۲۹	۱۲۹/۵۸
تلفات کل	۱۲/۲۷۸	۱۴/۳۲۵
هزینه کل	۱۵۴۳۳	۱۵۴۳۳

نکته آخری که می‌توان از جدول (۴) برداشت کرد این است که اگر چه تلفات بیشتر شده است ولی هزینه کل کاهش یافته است. در واقع هدف اصلی در بهینه کردن سیستم قدرت کاهش تلفات نیست بلکه کاهش هزینه کل سیستم است که در این مثال به‌وضوح دیده شده است و جایابی بهینه PFC نیز با هدف کاهش هزینه کل در خط ۱۹-۶ قرار داده شده است.

با مقایسه جدول (۴) و جدول (۳) دیده می‌شود که با قراردادن یک PFC با یک زاویه  $\delta$  ثابت در خط انتقال، در بیشتر وقت‌ها (تمام

- Merchant Transmission Project”, CIGRE 2008.
- [7] P.E. Marken; “**Variable Frequency Transformer-A Simple and Reliable Transmission Technology**”, India-Tech, Foundation 2nd Interactive Workshop on Transmission and Distribution, Mumbai, India, April 2009.
- [8] P. Marken, J. Marczewski, R. D’Aquila, P.Hassink, H.R.Roedel, R.L.Bodo; “**VFT-A Smart Transmission Technology that is Compatible with the Existing and Future Grid**”, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE2009, 000451, Seattle, WA, March 2009.
- [۹] هادی سعادت؛ بررسی سیستم های قدرت، فصل پخش بار اقتصادی، ۱۳۸۱.
- [۱۰] علی شکیبیا؛ پخش بار بهینه در سیستم های قدرت مجهز به ادوات FACTS، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۸۷.
- [11] I. Ziari, S. Jadid, A. Jalilian; “**A New Method for Modeling Loss in Distribution Network**”, Power and Energy Conference, PEcon06, pp. 229-234, 28-29 Nov. 2006.
- [12] M.R. Zarate, A.J. Conejo, F. Milano; “**OPF-Based Security Redispatching Including FACTS Devices**”, IET Generation, Transmission & Distribution, pp. 821-833, Feb. 2008.

## ۸- پی نوشت ها

- 1- Flexible AC Transmission System
- 2- Unified Power Flow Controller
- 3- Rotary Power Flow Controller
- 4- Variable Frequency Transformer
- 5- Rotary Phase Shifting Transformer
- 6- Langlois
- 7- Power Flow Controller
- 8- Hermitian