

## بهبود تراکم خطوط انتقال از طریق تعیین بهینه محل TCSC به کمک الگوریتم ژنتیک

حمید ایران منش<sup>۱</sup> مسعود رشیدی نژاد<sup>۱،۲</sup> ملیحه مغفوری فرسنگی<sup>۱</sup> حسین فرهمند<sup>۱،۳</sup>  
HIranmanesh@graduate.uk.ac.ir mrashidi@mail.uk.ac.ir mmaghfoori@mail.uk.ac.ir

۱- هسته پژوهشی سیستمهای قدرت، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- پژوهشکده انرژی، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی

**چکیده:** تجدید ساختار در صنعت برق با هدف تصحیح در مبادله انرژی الکتریکی شکل گرفته است. این امر باعث بوجود آمدن بستری جهت تعامل بین عوامل اقتصاد و مسائل تکنیکی سیستم قدرت گردیده است. از جمله این مسائل می توان به تراکم خطوط انتقال اشاره کرد. یکی از عوامل عمده در مدیریت تراکم خطوط انتقال استفاده از ادوات FACTS به منظور کاهش تراکم است. در مقاله حاضر سعی شده با جایابی بهینه یکی از این ادوات، تراکم خطوط موجود در سیستم مورد مطالعه بهبود یابد. نتایج مربوط به اعمال روش پیشنهادی به یک سیستم نمونه ای ۹ شینه IEEE گویای این مطلب است.

کلمات کلیدی: مدیریت تراکم، الگوریتم ژنتیک، ادوات FACTS، خازن کنترل شونده بوسیله ترستور (TCSC)

### ۱- مقدمه:

امروزه در سراسر دنیا صنعت برق تجدید ساختار شده است و یا در حال انجام می باشد. بطور کلی هدف از این امر افزایش کارایی، بهره برداری بهینه، مدیریت بهتر، شفاف سازی هزینه ها و امکان ایجاد حق انتخاب به مصرف کننده است. فی الواقع تجدید ساختار ابعاد متفاوتی از تغییر را شامل می شود. بر اساس مبانی نظری تجدید ساختار یک فرآیند چهار مرحله ای به شرح زیر است:

۱. مجزا سازی
۲. بازنگری در مقررات
۳. ایجاد رقابت
۴. خصوصی سازی

در حالیکه در بسیاری از موارد تجدید ساختار به اشتباه معادل خصوصی سازی تلقی میشود.

تحقق تجدید ساختار در تمامی صنایع و به مراتب در صنعت برق امکان پذیر است در حالیکه با توجه به ویژگی خاص محصول این صنعت یعنی "عدم امکان ذخیره سازی" برقراری تعادل بین تولید و مصرف برق اصلی ترین عامل در طراحی و پیاده سازی ساختار جدید میباشد. مضافاً اینکه تأمین انرژی الکتریکی صرفاً فرآیند ساده تولید و انتقال و توزیع را شامل نبوده بلکه ملاحظات خاصی منجمله برقراری امنیت، قابلیت اطمینان، پایداری، مدیریت تراکم و سایر مسائل از این قبیل بسیار ضروری است [۱].

محدودیت انتقال توان در خطوط انتقال از گذشته تحت عنوان تنگناهای انتقال همواره گریبانگیر بهره بردار سیستم انتقال بوده است. از آنجا که محل رخداد این تنگناها در شبکه های سنتی مشخص بوده و مقدار حدی آن در دوره معینی بسته به میزان تقاضا ثابت می مانده است، راه حل اساسی برای رفع این تنگنا در سیستم های سنتی، احداث خط انتقال یا افزایش ظرفیت نصب شده شبکه انتقال است. این محدودیت که تحت عنوان تراکم خطوط انتقال نام گذاری می گردد سبب می شود که ایمنی حالت پایدار شبکه به خطر افتد که در این صورت نیاز به تنظیم خروجی ژنراتور برای رفع تراکم با کمترین هزینه است.

با دسترسی آزاد در شبکه انتقال خصوصاً در سیستم های تجدید ساختار یافته تراکم خطوط شکل حادثی به خود خواهد گرفت که از حالت معین و ثابت در سیستم های سنتی به وضعیتی نامعین، غیر دقیق، ریسک پذیر و بعضاً در شرایطی از پیش تعیین شده تغییر می یابد [۲].

## ۲- مدیریت تراکم در سیستم های قدرت:

دسترسی آزاد به سیستم انتقال اولین قدم در راه تجدید ساختار در صنعت برق است. بهر حال دو مشخصه اصلی شبکه انتقال باعث لزوم دسترسی آزاد می باشند:

۱- تراکم خطوط انتقال

۲- تلفات خطوط انتقال

تراکم نتیجه محدودیت های شبکه است که ظرفیت نهایی سیستم را مشخص می کند که این امر انتقال همزمان توانهای قراردادی را محدود می کند. تلفات انتقال تفاوت بین کل تولید و مصرف توان در سیستم قدرت است. هر دوی تلفات انتقال و تراکم انتقال باعث افزایش قیمت توان انتقالی می شود که سهم بیشتر این افزایش متعلق به تراکم نسبت به سهم تلفات است. مدیریت تراکم بعنوان مرکز بحث های مربوط به تسهیل رقابت بیشتر در بازار برق نیز اهمیت پیدا می کند [۳].

به بیان دیگر تراکم در شرایطی تعریف می شود که توان دلخواه عبوری از خط حدود قابلیت اطمینان سیستم رانقض کند.

حدود قابلیت اطمینان سیستم را می توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- محدودیت های فیزیکی

۲- محدودیت های سیستمی

حد حرارتی تجهیزات انتقال جزء محدودیت های فیزیکی شبکه انتقال و حد ولتاژ و پایداری گذرا جزء محدودیت های سیستمی شبکه می باشد.

بر اساس این تعاریف مدیریت تراکم به اموری اطلاق می شود که برای جلوگیری از بروز تراکم و یا آزاد نمودن ظرفیت انتقال انجام شود. بنابراین به طور کلی مدیریت تراکم می تواند به صورت یک راهکار سیستماتیک برای برنامه ریزی و انطباق تولید و مصرف در نظر گرفته شود [۴].

## ۳- سیستم های انتقال انعطاف پذیر AC:

سیستم های انتقال انعطاف پذیر AC به سیستم هایی گفته می شود که در آن از تکنولوژی نیمه هادیها ( کلیدهای ایستا) برای افزایش بهره وری سیستم استفاده شده است. البته به کارگیری این ادوات به سال ۱۹۷۵ میلادی بر

می گردد که SVC ها (*Static Var Compensator*) برای تثبیت ولتاژ و افزایش ظرفیت توان انتقالی به کار گرفته شدند. ولی مفهوم "سیستمهای انتقال AC انعطاف پذیر" نتیجه یک گروه کاری EPRI (*Electric Power Research Instituted*) است که در سال ۱۹۸۸ میلادی تشکیل گردید و هینگورانی در سخنرانی افتتاحیه کنفرانس قدرت آمریکا این مفهوم را تحت این عنوان مطرح کرد.

عوامل متعددی در گرایش از مفهوم سنتی سیستمهای انتقال به سوی مفهوم سیستمهای انتقال انرژی انعطاف پذیر دخالت دارند که از آن میان می توان به دو هدف عمده زیر اشاره کرد:

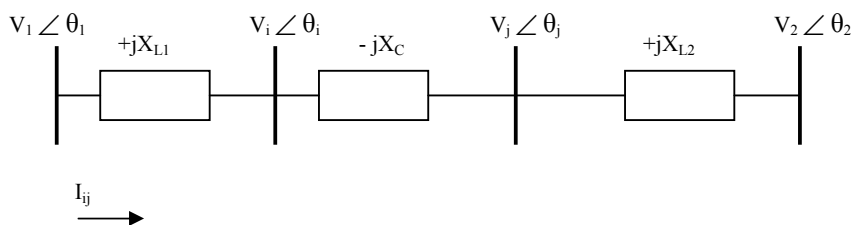
- افزایش قابلیت انتقال توان سیستم های انتقال
- عبور دادن توان از مسیرهای مورد نظر

هدف اول به این معنی است که اگر پایداری سیستم در هنگام وقوع خطا و پس از آن با اعمال کنترل بلا درنگ توان حفظ شود می توان توان انتقالی را تا رسیدن به حد حرارتی افزایش داد. در صورتی که با اعمال کنترل های بلا درنگ پایداری حفظ گردد. البته این هدف بدان معنا نیست که خطوط همیشه در حد حرارتی خود کار کنند زیرا تلفات انتقال زیاد و غیر قابل قبول خواهد بود) اما این امر در شرایط اضطراری ممکن است بکار گرفته شود.

هدف دوم بیان می دارد که در صورت قابل کنترل بودن جریان خط می توان عبور توان را از طریق کریدورهای انتقال دلخواه عبور داده و عبور گردشی توان را محدود کرده همچنین این هدف بصورت ضمنی بیان می دارد که تغییر سریع مسیر عبور توان در صورت وقوع حادثه ای باید امکان پذیر باشد تا عبور توان در کل سیستم انتقال به شکل دلخواه باشد [۵۶].

### ۳-۱ مطالعه ساختمان و اصول عملکرد TCSC:

جبرانگرهای سری مدتهاست جهت افزایش پایداری و بار پذیری شبکه های انتقال فشار قوی به کار گرفته شده اند. اساس کار عبارت است از جبران افت ولتاژ سلفی خط با قرار دادن یک ولتاژخازنی یا به عبارت دیگر کاهش راکتانس مؤثر خط انتقال که این عمل همراه با افزایش بارپذیر خط انتقال صورت می گیرد.



شکل ۱- یک سیستم انتقال با جبران خازنی سری

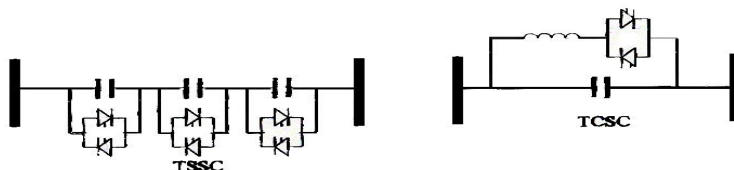
خطوط انتقال را می توان با خازن های سری ثابت یا به صورت مؤثری با خازن های سری قابل کنترل بوسیله سوئیچهای تایریستوری، جبران کرد. خازن سری قابل کنترل می تواند به یکی از دو صورت زیر باشد:

- جبران سری کنترل شده تایریستوری TCSC<sup>۱</sup>
- جبران سری سوئیچ شده تایریستوری TSSC<sup>۲</sup>

۱- Thyristor Controlled Series Compensation

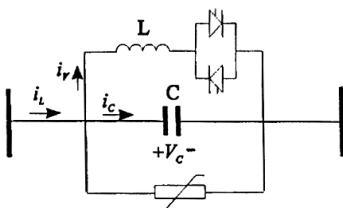
۲- Thyristor Switched Series Compensation

در آرایش TCSC، از راکتورهای کنترل شده تایریستوری موازی با بخش هایی از یک بانک خازنی استفاده می شود. این ترکیب، به TCSC امکان می دهد که با هدایت تایریستورهای یک راکتانس سلفی خالص را در خط قرار دهند و یک المان راکتیو پیوسته را فراهم آورد. در TSSC، سوئیچهای تایریستوری بصورت موازی با بخش های یک بانک خازنی قرار گرفته اند تا بتوانند سریعاً قسمت هایی از بانک خازنی را بصورت گسسته در مدار قرار داده یا از مدار خارج کنند. شکل ۲ قسمت های مهم طرح های مختلف جبران سری را نشان می دهد.



شکل ۲- طرح های مختلف جبران سری

مدار اصلی TCSC، شامل یک بانک خازنی و یک شاخه سلفی کنترل شده با تایریستور است که با هم موازی شده اند. این مدار در شکل ۳ نشان داده شده است [۷].



شکل ۳- عناصر مدار اصلی TCSC

مشخصه مدار اصلی TCSC به راکتانس های نسبی بانک خازنی  $X_c = -\frac{1}{\omega_n C}$  و شاخه تایریستور

$X_v = \omega_n L$  بستگی دارد. فرکانس تشدید مدار LC که بوسیله اندوکتانس شاخه تایریستوری و کاپاسیتانس بانک خازنی سری تشکیل می شود، برابر است با:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_n \sqrt{\frac{-X_c}{X_v}} \quad (1)$$

پارامتر  $\lambda$  نیز به صورت خارج قسمت فرکانس تشدید و فرکانس شبکه تعریف می شود.

$$\lambda = \frac{\omega_R}{\omega_n} = \sqrt{\frac{-X_c}{X_v}} \quad (2)$$

مقادیر منطقی  $\lambda$ ، بین ۲ تا ۴ می باشد. بنابراین در فرکانس نامی، راکتانس القاگر بسیار کمتر از راکتانس بانک خازنی است. TCSC می تواند در چندین مد کار کند که راکتانس ظاهری هر کدام متفاوت است. در بحث حاضر، امپدانس یا راکتانس ظاهری به صورت قسمت موهومی خارج قسمت بین فازورهای پایه ولتاژ خازن و پایه جریان خط در فرکانس نامی تعریف می شود.

$$Z = X_{app} = \text{Im} \left\{ \frac{V_{C1}}{I_{L1}} \right\} \quad (3)$$

مضاف بر این، می توان ضریب تقویت  $K_B$  را به صورت خارج قسمت بین راکتانس فیزیکی و ظاهری TCSC تعریف کرد:

$$K_B = \frac{Z}{X_C} = \frac{X_{app}}{X_C} \quad (4)$$

#### ۴- روشهای مدیریت تراکم خطوط انتقال انرژی الکتریکی:

دلایل مختلفی چون خروج خطوط، خروج ژنراتورها یا تغییر در میزان قراردادهای تبادل توان، ممکن است سبب شود بخشهایی از شبکه با اضافه بار روبرو شوند. در ساختار سنتی این مشکل با دستورالعملهایی بر طرف می گردید در صورتی که در ساختار جدید به دلیل جداسازی بخشهای صنعت برق این کار تحت عنوان مدیریت تراکم و با ابزارهای دیگری چون تخصیص ظرفیت رزرو، ایجاد حق انتقال و قیمت گذاری تراکم و یا ابزارهای دیگری چون ادوات انعطاف پذیر انجام می شود [۸].

یکی از کاربردهای اساسی عناصر FACTS کنترل فلو می توان در شبکه انتقال است. از آنجا که محدودیت انتقال توان شبکه اساساً با کنترل فلو می توان در شبکه قابل رفع یا کاهش است استفاده از این عناصر برای مدیریت تراکم بسیار مفید به نظر می رسد. راهکارهای متفاوتی برای استفاده از این عناصر در رفع تراکم شبکه پیشنهاد شده که هر کدام در یک روش خاص مدیریت تراکم استفاده شده است. یکی از مزایای استفاده از این عناصر نصب و بهره برداری سریع آنها در مقایسه با احداث خطوط انتقال جدید است.

#### ۴-۱ روشهای بهینه جابجایی ادوات FACTS:

الگوریتم بهینه سازی برای مکان یابی ادوات FACTS، شامل روشهای گوناگون است. با توجه به تابع هدف و قیود مطرح در مساله مکان یابی روش مناسب انتخاب می شود. از این روشها می توان از برنامه ریزی خطی برنامه ریزی غیر خطی، روش آنالیز حساسیت، روشهای تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک نام برد.

الگوریتمهای تکاملی، روشهای بهینه سازی تصادفی هستند که ایده اصلی آنها از نظریه تکاملی طبیعی گرفته شده است. در محیط طبیعی، هر نسل خصوصیتی را از نسل قبل به ارث می برد، در حالیکه معمولاً خصوصیات جدیدی نیز در این نسل به چشم می خورد. در یک نسل، آن عده از اعضای جمعیت در تنازع بقاء پیروز می شوند که سازگاری با محیط اطراف داشته و برای ادامه بقاء قویتر باشند. نسل جدید، چون زاده جمعیتی از نسل قدیم با خصوصیات برتر است در حالت کلی، سازگاری بیشتری با محیط دارد و به بیان دیگر، در جهت تکامل حرکت می کند.

#### ۵- الگوریتم ژنتیک:

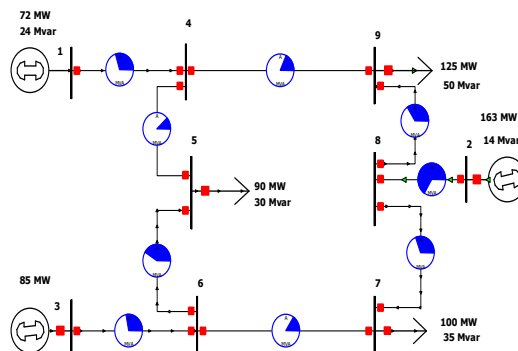
الگوریتمهای ژنتیک یک مدل از الگوریتمهای تکاملی است که رفتارشان از مکانیسمهای تکاملی در طبیعت الگو برداری شده است به طوری که مکانیسم افراد جامعه به وسیله کروموزوم مشخص می شوند. جمعیت کروموزومها (افراد جامعه) بعد از این وارد مرحله شبیه سازی تکاملی می شوند. الگوریتمهای ژنتیک در سطوح مختلف کاربرد دارند. یک مثال از کاربرد آنها بهینه سازی مسائل چند بعدی است که کروموزومهای آن به وسیلهی مقادیر مختلف کد بندی می شوند. در عمل، محاسبات مدل ژنتیک روی آرایه های بیتی یا کارکتهائی که کروموزوم را مشخص می کند، انجام می شود. عملگرهای انجام کار روی یک بیت ساده اجازه انجام کار توسط عملگرهای تزویج و جهش و دیگر عملگرها را می دهد [۹].

## ۱-۵ شیوه عملکرد الگوریتم‌های ژنتیکی

ابتدا به طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها تولید می‌شود و سپس برازندگی تمام کروموزوم‌های (افراد) داخل جامعه محاسبه و تعیین می‌گردد. به وسیله عملگرهای تزویج و جهش و دیگر عملگرها جامعه‌ای جدید بوجود می‌آید و تکرار یک بار حلقه بالا باعث بوجود آمدن یک نسل می‌شود. در هر بار انجام حلقه، از جامعه قبلی صرف نظر می‌شود و به جای آن جامعه جدید قرار می‌گیرد. نسل اول (نسل صفر) در حقیقت به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و سپس با توجه به برازندگی مولودها (کروموزوم‌ها) و عملگرهای موجود جامعه به طرف برازندگی بالا سوق پیدا می‌کند.

## ۶- سیستم مورد مطالعه:

در این بخش بررسی بهبود تراکم خطوط انتقال مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای انجام این امر شبکه ۹ شینه استاندارد IEEE همانند شکل ۴ به کمک نرم افزار Power World شبیه سازی می‌شود.



شکل ۴- شبکه ۹ شینه IEEE

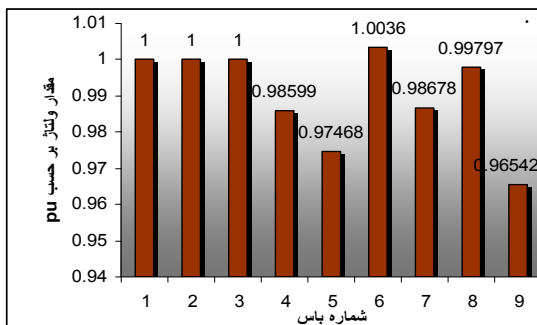
در انجام این کار از الگوریتم ژنتیک برای جابجایی بهینه TCSC و تعیین میزان جبران مورد نیاز استفاده شده است. در این بررسی برای تولید نسل بعد از روش جمعیت ثابت استفاده شده است. یعنی کروموزومهای والد، پس از همبندی و تولید فرزند از جمعیت حذف می‌شوند. همچنین برای عملگر انتخاب از چرخ گردان استفاده شده است.

در مرحله اول هدف بهبود MVA کل عبوری از خطوط می‌باشد. همانطور که بصورت کلاسیک انتظار می‌رود در مرحله اول به علت تراکم بیشتر نسبت به سایر خطوط، در خط بین باسهای ۸ و ۲، وجود TCSC، ضروری به نظر می‌رسد. عنصر TCSC پس از اجرا کردن برنامه بین باس ۸ و ۲ با ظرفیت ۵۰.۸۲٪ راکتانس کل خط قرار می‌گیرد.

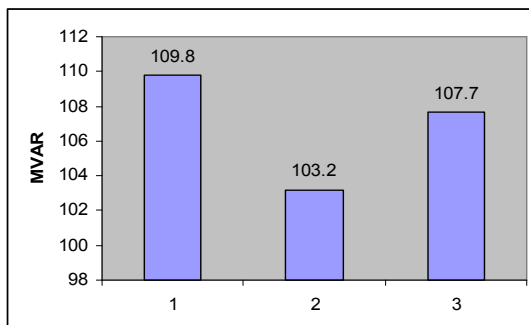
در این مرحله با افزایش مصرف توان اکتیو در شین ۹ به میزان ۲۵ MW، مشاهده می‌شود، عبور توان اکتیو در شبکه همراه با TCSC به میزان ۳۲.۸ MW افزایش پیدا کرده است. در مرحله دوم علاوه بر بهبود پروفیل ولتاژ، قیمت نیز بعنوان یکی از اهداف بهینه سازی مد نظر قرار می‌گیرد. در اینجا از پخش بار بهینه (OPF) به جای پخش بار عادی استفاده می‌شود. برنامه پس از اجرا محل بهینه نصب TCSC را خط بین دو باس ۹ و ۴ مشخص می‌کند و ظرفیت بهینه TCSC را نیز ۳۹.۷۶٪ راکتانس کل خط در نظر می‌گیرد. در این مرحله نمودار میله ای پروفیل ولتاژ بهبود یافته همانند شکل ۵ می‌باشد. در این قسمت نیز با افزایش ۲۵ MW توان اکتیو مصرفی در شین ۹، مشاهده می‌شود، عبور توان اکتیو در شبکه شامل TCSC به میزان ۳۲.۷ MW افزایش پیدا کرده است.

در اینجا برای تجزیه و تحلیل داده های خروجی شبکه از جعبه ابزار MatPower و اضافه کردن مقادیر آن در سیستم شبه سازی شده به کمک نرم افزار Power World استفاده می‌شود.

همین طور که در نمودار میله ای شکل ۶ مشاهده می شود، مقدار عبور توان راکتیو در کل شبکه بدون TCSC مقدار ۱۰۹٫۸ MVAR است، که این مقدار در مرحله اول ۶٫۶ MVAR و در مرحله دوم که در تابع هدف قیمت نیز مد نظر قرار داده شد ۲٫۱ MVAR کمتر از مقدار اولیه می باشد.



شکل ۵- پروفیل ولتاژ



شکل ۶- مقایسه تراکم خطوط

## ۷- نتیجه گیری:

در این مقاله با کمک الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین مکان و مقدار بهینه TCSC بعنوان یکی از ادوات FACTS جهت بهبود تراکم خطوط انتقال و همچنین جهت حصول بهترین پروفیل ولتاژ، درمورد یک سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE پیاده سازی شد. نتایج حاصله در این شرایط حاکی از بهبود تراکم خطوط در سیستم مورد نظر می باشد.

## ۸- مراجع:

- [1] Y.H.Song, X.Wang "Operation of market-Oriented Power System", Springer 2003.
- [2] A.Fattahi mey abady, M.Ehsan "Transmission Congestion Management in Restructured Power System", Journal of Electrical Science and Technology, No.37, 2003, pp 55-68.
- [3] Harry Singh, Shangyou Hao, Alex Papalexopoulos "Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans.on Power Systems, Vol.13, No.2, May 1998.
- [4] B.J.Kirby, J.W.Van Dyke, C.Martinez, A.Rodriguez "Congestion Management Requirements, Methods and Performance Indices", June 2002. Oak Ridge National Laboratory & Electric Power Group Southern California Edison.
- [5] M.EREMIA, "Introduction to FACTS and A.I :A challenge for power systems engineers, ERASMUS IP, Bucharest Romania, 27 May-7 June 2002.
- [6] L. Gyugyi, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", Y. H. Song and A. T. Johns, Eds., 1999.
- [7] Garng M.Huang, Ping Yan, "TCSC and SVC as Re-dispatch Tools for Congestion Management and TTC Improvement", IEEE 2002, pp 660-665.
- [8] S.C.Srivastava and P.Kumar, "Optimal power dispatch in deregulated market considering congestion management", Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Proceedings.DRPT 2000. International Conference, PP.53-59, 2002.
- [9] Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Longman, 1989.