

# مروری بر روش‌های توسعه شبکه انتقال در محیط تجدید ساختار

بابک خانعلی\*

کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان، مهندسی قدرت، سمنان

رضا کی پور

استادیار گروه برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، دانشکده برق و کامپیوتر، سمنان

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۰/۳

## چکیده

طراحی توسعه انتقال یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی توسعه در سیستم‌های قدرت است. طراحی توسعه انتقال از دیدگاه‌ها و زوایای مختلفی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. اما در عین حال تمامی این طراحان سعی در ارائه طرحی بر مبنای معیارهای فنی و معیارهای اقتصادی نموده‌اند. با توجه به ایجاد تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت و جدا شدن بخش‌های تولید، انتقال و توزیع، اهداف طراحی توسعه تغییر و به‌دنبال آن عدم قطعیت‌های سیستم افزایش یافت. در این محیط جدید شرکت‌کنندگان بازار برای دستیابی به سود بیشتر با یکدیگر به رقابت پرداخته و استراتژی و تصمیم‌گیری‌های خود را به‌منظور دستیابی به حداکثر سود تنظیم می‌نمایند. با تغییر اهداف بهره‌برداری از سیستم قدرت در این محیط جدید و رقابتی شدن آن، بالطبع روش‌ها و اهداف برنامه‌ریزی تولید و انتقال نیز دست‌خوش تغییر شده و نیاز به بازنگری مجدد دارند. همچنین توسعه شبکه انتقال در بازارهای برق رقابتی، در هر مرحله، برای برخی کاربران سود، و برای برخی ضرر را به‌همراه خواهد داشت. از این رو در این مقاله به بررسی دسته‌بندی روش‌های توسعه انتقال در سیستم‌های سنتی و جدید پرداخته شده است.

## واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی، تجدید ساختار، توسعه شبکه انتقال، دینامیک و استاتیک، قطعی و غیرقطعی.

## ۱. مقدمه

امروزه اکثر بخش‌های زندگی بشر به انرژی الکتریکی وابسته است. این وابستگی، تأمین انرژی الکتریکی با کیفیت مطلوب و تداوم مناسب آن را به یکی از عوامل اساسی در جهت دستیابی به استانداردهای بهتر زندگی تبدیل کرده است. لازمه دستیابی به هدف مذکور، مدیریت منطقی و برنامه‌ریزی مطلوب و بهینه در صنعت برق می‌باشد. لذا مقوله برنامه‌ریزی توسعه در سیستم‌های قدرت به منظور ارتقاء کیفیت و بالا بردن بهره‌وری تولید و مصرف انرژی بیش از پیش احساس می‌گردد. به‌ویژه شبکه‌های انتقال که به‌عنوان شبکه واسط بین منابع تولید و مراکز بار، نقش اساسی در تأمین مطمئن برق را بر عهده دارند. بنابراین یکی از مؤلفه‌های اصلی و مهم برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال است.

شبکه انتقال در بازار برق رقابتی نقش مهمی ایفا می‌کند. در یک محیط عادلانه و رقابتی، بایستی همه شرکت‌کنندگان در بازار از امکان دسترسی به شبکه انتقال برخوردار باشند (Maghouli, 2009, 1051). در ساختار جدید صنعت برق مساله توسعه شبکه انتقال بر مبنای فراهم نمودن فضای رقابتی جهت خرید و فروش انرژی الکتریکی مورد توجه محققین قرار گرفته است. شبکه انتقال در بازار برق رقابتی نقش مهمی ایفا می‌کند. در یک محیط رقابتی، شبکه انتقال باید برای همه شرکت‌کنندگان در بازار امکان دسترسی یکسان به منظور خرید و فروش برق را فراهم نماید (Buygi, 2003, 7). به عبارت دیگر شبکه انتقال بایستی میدان مناسبی برای رقابت در بازار برق ایجاد کند. اگر ساختار شبکه انتقال از استحکام مناسبی برخوردار باشد، پیشنهاددهندگان قیمت‌ها، از نقاط دور و نزدیک در خرید و فروش انرژی به رقابت با یکدیگر می‌پردازند و بدین وسیله از اعمال قدرت بازار توسط برخی از شرکت‌کنندگان که به صورت افزایش قیمت برق به دلیل ایجاد تراکم در شبکه انتقال بروز می‌کند، جلوگیری می‌شود (Fang, 2003, 374). ضمن اینکه این امر می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم قدرت را بهبود دهد. رقابتی شدن که مشخصه عمده تجدید ساختار است، سبب شده تا روش‌ها و چارچوب‌های مرسوم برنامه‌ریزی دست‌خوش تغییرات اساسی شوند. برای دستیابی به هدف مذکور، مساله برنامه‌ریزی توسعه انتقال در سیستم‌های قدرت مطرح شده است. تاکنون نمونه‌های متنوعی با اهداف گوناگون و همچنین از دیدگاه‌های مختلف، برای مساله توسعه شبکه انتقال ارائه شده است (Maghouli, 2010, 470). با این وجود می‌توان گفت تئوری و ابزارهای موجود مساله برنامه‌ریزی

توسعه شبکه انتقال، هنوز کمتر از نیازهای عملی بازارهای جدید برق است. در مرجع (صمدی، ۱۳۸۸) تعدادی از نمونه‌های موجود پیرامون این مساله، ارائه و دسته‌بندی شده است. هدف اصلی در برنامه‌ریزی توسعه انتقال تعیین نوع، تعداد و مکان احداث خطوط جدید با توجه به وضعیت شبکه، بار و تولید است در شرایطی که قیود فنی و اقتصادی سیستم در نظر گرفته شوند (Zadeh, 2010, 938) و اهدافی نظیر حداکثرسازی سود مشارکت‌کنندگان بازار یا حداقل‌سازی هزینه‌ها تأمین شوند (Abdelaziz, 2000, 642). لازمه دستیابی به هدف فوق بررسی نقش پارامترهای موثر در این زمینه می‌باشد. در این مقاله به بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار می‌پردازیم. همچنین با توجه به تجدید ساختار در صنعت برق، نیاز به بازبینی مدل‌ها و نیز الگوریتم‌های به کار رفته برای حل مساله توسعه شبکه انتقال احساس شده است. از این رو در این مقاله به بررسی دسته‌بندی روش‌های توسعه انتقال در سیستم‌های سنتی و جدید پرداخته شده است.

## ۲. طبقه‌بندی روش‌های طراحی توسعه انتقال

روش‌های طراحی توسعه انتقال، از دیدگاه‌های مختلفی می‌تواند طبقه‌بندی گردد. از دیدگاه عدم قطعیت‌ها در سیستم قدرت، روش‌های طراحی توسعه انتقال می‌تواند به صورت زیر طبقه‌بندی شود.

### ۱. روش‌های قطعی، ۲. روش‌های غیرقطعی

در روش‌های قطعی، طرح انتقال تنها برای بدترین مورد سیستم بدون در نظر گرفتن احتمال رخداد آن‌ها طراحی می‌شود. در روش‌های غیرقطعی، طرح انتقال برای تمامی موارد ممکن که احتمال وقوع در آینده دارند، با در نظر گرفتن احتمال رخداد آن‌ها، طراحی می‌شود. بنابراین روش‌های غیرقطعی، قادر به در نظر گرفتن تجربه گذشته و انتظارات آینده هستند.

از دیدگاه افق سیستم قدرت، روش‌های طراحی توسعه انتقال می‌تواند به صورت زیر طبقه‌بندی گردد:

### ۱. روش‌های استاتیک، ۲. روش‌های دینامیک

در طراحی استاتیک، طراح، طرح بهینه را برای یک سال از افق طراحی جست‌وجو می‌کند، یعنی، طراح تنها به سؤالات «چه» ابزارهای انتقالی باید به شبکه متصل گردد و «کجا» این تجهیزات باید نصب گردند، پاسخ می‌دهد. در طراحی دینامیک، چندین سال مدنظر قرار می‌گیرد و طراح، استراتژی بهینه در طول مدت طراحی را جست‌وجو می‌کند. به عبارت دیگر، در طراحی دینامیک، طراح، علاوه

مبهم و غیردقیق اطلاعاتی هستند که به روشنی نمی‌توانند بیان شوند. درجه اهمیت ملاک‌های متفاوت در طراحی چندهدفه در این طبقه قرار می‌گیرد. روش‌های نامعین که برای طراحی توسعه انتقال استفاده شده‌اند، عبارتند از: ۱. پخش بار احتمالی، ۲. ملاک‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن احتمالات، ۳. تکنیک سناریو، ۴. آنالیز تصمیم‌گیری و ۵. تصمیم‌گیری فازی. روش‌های پخش بار احتمالی و ملاک‌های قابلیت اطمینان، نامعلومی‌های تصادفی را مدنظر قرار می‌دهند. آنالیز تصمیم‌گیری یک روش کامل برای برنامه‌ریزی دینامیکی است. تصمیم‌گیری فازی نیز اطلاعات مبهم و غیردقیق را مدنظر قرار می‌دهد.

### ۱-۳. پخش بار احتمالی

پخش بار احتمالی برای آنالیز شبکه و طراحی توسعه در سیستم‌های قدرت سنتی به کار می‌رود. پخش بار احتمالی، شبیه به پخش بار ساده است، با این تفاوت که توابع چگالی احتمال بارها را به‌عنوان ورودی می‌گیرد و توابع توزیع احتمال متغیرهای خروجی را محاسبه می‌کند. این روش می‌تواند با شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش‌های آنالیزی و ترکیب آنها انجام شود. توابع توزیع احتمال بارها می‌تواند با در نظر گرفتن پیش‌بینی بار و آنالیز نامعلومی‌ها تخمین زده شوند. برای کاهش محاسبات، معادلات پخش بار حول ناحیه مقدار مورد انتظار خطی‌سازی می‌شود و سپس تکنیک کانولوشن برای محاسبه توابع توزیع احتمال خروجی به کار می‌رود. الگوریتم طراحی توسعه انتقال با به‌کارگیری پخش بار احتمالی به‌صورت زیر است (da Silva, 1990, 1047).

اجرای پخش بار احتمالی برای شبکه موجود و وارد نمودن توابع چگالی احتمال بارها برای افق طراحی، ملاک‌های فنی مانند احتمال نقض محدودیت‌های توان خط و محدودیت‌های ولتاژ.

- پیشنهاد چندین طرح توسعه با در نظر گرفتن ملاک‌های فنی محاسبه شده؛
- اضافه کردن هر یک از طرح‌های پیشنهادی به شبکه به‌طور جداگانه، اجرای پخش بار احتمالی و محاسبه ملاک‌های فنی برای هر طرح؛
- انتخاب طرح نهایی با در نظر گرفتن ملاک‌های فنی و آنالیزهای اقتصادی.

### ۲-۳. ملاک‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن احتمالات

الگوریتم طراحی توسعه انتقال با به‌کارگیری ملاک‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن احتمال به‌صورت زیر است (Xie, 2007, 1420).

بر سؤال «چه» و «کجا»، باید به سؤال «چه وقت» ابزارهای انتقال در افق طراحی نصب گردند، پاسخ دهد.

از دیدگاه ساختارهای سیستم قدرت، روش‌های طراحی توسعه انتقال به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود.

۱. سیستم‌های قدرت سنتی؛

۲. سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.

هدف اصلی از طراحی توسعه در سیستم‌های قدرت سنتی برآورده کردن بارها است. در صورتی که قابلیت اطمینان سیستم و کیفیت سرویس‌دهی نیز تأمین گردد. در این محیط نامعلومی‌ها کم است. طراحی توسعه انتقال متمرکز و متناسب با طراحی توسعه تولید است. طراحان به اطلاعات لازم برای طراحی دسترسی دارند. در این سیستم‌ها، مکان بارها و تولیدها، اندازه بارها و واحدهای تولیدی، در دسترس بودن واحدها، الگوی بار و الگوی توزیع معلوم هستند. بنابراین، طراحان می‌توانند ارزان‌ترین طرح انتقال را با در نظر گرفتن معیارهای قابلیت اطمینان ارایه دهند. طراحی انتقال در سیستم‌های سنتی با یک مساله بهینه‌سازی مدل می‌شود. تابع هدف، هزینه طراحی و عملکرد، با قیود اقتصادی و فنی است. به‌طور کلی این بهینه‌سازی یک بهینه‌سازی مقید صحیح مختلط غیرخطی است. روش‌های مختلف ریاضیاتی و مفهومی برای حل این مساله ارایه شده است (Latorre, 2002, 938). اما تجدید ساختار اهداف طراحی توسعه انتقال را تغییر داده است و باعث تفکیک بخش‌های تولید و انتقال شده و نامعلومی‌ها را در سیستم قدرت افزایش داده است. به‌واسطه این تغییرات، روش‌های جدیدی برای طراحی توسعه انتقال نیاز هستند. هدف این مقاله بررسی روش‌های ارایه شده در طراحی توسعه انتقال برای محیط‌های سنتی و تجدید ساختار یافته است.

### ۳. روش‌های طراحی توسعه انتقال غیرقطعی

در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، نامعلومی‌ها می‌توانند به‌صورت زیر طبقه‌بندی شوند.

۱. نامعلومی‌های تصادفی، ۲. نامعلومی‌های غیرتصادفی

نامعلومی‌های تصادفی انحراف از پارامترهایی هستند که تکرارپذیرند و یک توزیع احتمال شناخته شده‌ای دارند. بنابراین احتمالشان از مشاهدات گذشته به دست می‌آید. نامعلومی در بار، در این طبقه جای می‌گیرد. نامعلومی‌های غیرتصادفی، پارامترهایی هستند که تکرارپذیر نیستند و بنابراین احتمالشان از مشاهدات گذشته به دست نمی‌آید. توسعه تولید، در این گروه جای می‌گیرد. در کنار نامعلومی‌ها، اطلاعات مبهم و غیردقیق در طراحی توسعه وجود دارد. اطلاعات

۵. ملاک Hurwicz: طرحی که یک ترکیب محدب از خوشبینانه ترین راه‌حل‌ها و بدبینانه‌ترین راه‌حل‌ها را مینیمم می‌کند، به‌عنوان طرح نهایی انتخاب می‌شود (Cigre, 1995, 143).

۶. ملاک بهینه Pareto-optimal: یک طرح بهینه Pareto optimum است، اگر به‌وسیله هر طرح دیگری تحت سلطه قرار نگیرد. طرح X تحت تسلط به‌وسیله Y است، اگر هزینه آن بیشتر از هزینه طرح Y در تمامی سناریوها باشد (Cigre, 2000, 154). این معیار برای حذف بدترین راه‌حل‌ها مناسب است.

۷. ملاک قدرت: یک طرح در یک سناریو قوی است، اگر انصراف آن در این سناریو صفر باشد. برطبق این معیار یک طرح قابل پذیرش است، اگر حداقل در  $\eta\%$  از سناریوها، قوی باشد (Miranda, 1998, 643 & 1038; Cigre, 2000, 154).

۸. ملاک قدرت  $\beta$ : مطابق با این ملاک یک طرح قابل پذیرش است، اگر هزینه کلی آن با توجه به طرح بهینه مرتبط با آن از  $\beta\%$  در هر سناریو تجاوز نکند.

بحث زیر از مقایسه ملاک‌های تکنیک سناریو نتیجه می‌شود:

- برای به‌کارگیری هزینه پیش‌بینی شده، فرض اساسی احتمال باید برقرار شود. یعنی، سناریوها باید تکرارپذیر باشند و قوانین حاکم بر پدیده‌ها ثابت باقی بماند، به گونه‌ای که رخداد پیاپی هر سناریو تمایل به نزدیک شده به مقدار احتمالی تعیین شده آن داشته باشد (Miranda, 1998, 643 & 1038);
- ملاک هزینه پیش‌بینی شده یک ارزش‌گذاری پیشین است. یعنی، راه‌حل نهایی پیش از دانستن اینکه کدام سناریو رخ می‌دهد، انتخاب می‌شود در حالی که مینیمم کردن ماکزیمم انصراف یک ارزش‌گذاری پسین است. یعنی، راه‌حل نهایی بعد از تعیین نتایج هر راه‌حل در هر سناریو آینده داده‌شده، انتخاب می‌شود (Miranda, 1998, 643 & 1038);
- هزینه پیش‌بینی شده  $L_1$  وزنی را استفاده می‌کند و ماکزیمم مینیمم انصراف  $L_\infty$  را به کار می‌برد (Cigre, 2000, 154) و (Miranda, 1998, 1038 و Miranda, 1998, 643);
- هزینه پیش‌بینی شده ممکن است منجر به پیچیده شدن راه‌حل‌هایی که خوب است در یک محیط نامعین مورد توجه قرار گیرد، شود (Miranda, 1998, 1038 و Miranda, 1998, 643);
- تعدادی از سناریوها می‌توانند با انجام آنالیز حساسیت به‌منظور رد کردن نامعلومی‌ها با اثر کم بر نتیجه نهایی کاهش یابد (CIGRE, 1995, 143);
- برای تصمیمات خیلی مهم، در جایی که بقا تحت یک سناریو غیرمحتمل اما خطرناک نیاز است، عاقلانه است که مینیمم ماکزیمم انصراف را به‌عنوان یک ابزار تست آینده به کار ببریم (CIGRE, 1995, 143);

- پیشنهاد چند طرح توسعه با آنالیز شبکه موجود؛
- اضافه کردن هر طرح پیشنهادی به‌طور جداگانه و محاسبه ملاک‌های قابلیت اطمینان مانند مقدار انرژی پیش‌بینی شده فراهم نشده، تعداد بارهای خارج شده پیش‌بینی شده و مدت زمان پیش‌بینی شده برای خروج بارها برای هر طرح با به‌کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو؛
- انتخاب طرح نهایی با در نظر گرفتن ملاک‌های قابلیت اطمینان و آنالیز اقتصادی.

### ۳-۳. تکنیک سناریو

تکنیک سناریو و آنالیز تصمیم‌گیری، روش‌های عمومی هستند و می‌تواند برای طراحی هر سیستم به کار روند. الگوریتم طراحی انتقال با به‌کارگیری تکنیک‌های سناریو به‌صورت زیر است (De la Torre, 1999, 460):

- تعیین مجموعه‌ای از سناریوهای احتمالی آینده: یک سناریو مجموعه‌ای از پیامدهای آینده یا تحقق‌هایی از تمامی نامعلومی‌هاست. سناریوها باید به‌گونه‌ای تعیین شوند که تمامی نامعلومی‌های غیرتصادفی را پوشش دهند؛
- تعیین احتمال رخداد یا درجه رخداد سناریوهای آینده؛
- تعیین مجموعه‌ای از راه‌حل‌های ممکن (طرح‌های توسعه)؛
- انتخاب یک تابع هزینه برای اندازه‌گیری؛
- انتخاب طرح نهایی.

### ۴-۳. معیارهای انتخاب طرح نهایی

۱. معیارهای هزینه مورد انتظار: این ملاک طرحی را انتخاب می‌کند که هزینه مورد انتظار را بر روی تمامی سناریوهای مختلف مینیمم کند (Cigre, 1995, 143; Cigre, 2000, 154; Ward, 2000, 37).

۲. ملاک مینیمم کردن ماکزیمم انصراف (آنالیز ریسک): در آنالیز ریسک بهترین راه‌حل با مینیمم کردن انصراف به‌دست می‌آید (Miranda, 1998, 643 & 1038). انصراف یک اندازه‌گیری از ریسک است.

۳. ملاک لاپلاس: مطابق با این معیار طرحی که مجموع هزینه‌ها بر روی تمامی سناریوها را مینیمم می‌کند به‌عنوان طرح نهایی انتخاب می‌شود.

۴. ملاک Von Neumann-Morgenstern: این معیار خیلی بدبین است و اعتقاد دارد بدترین سناریو رخ می‌دهد (Cigre, 1995, 143). طبق این معیار، طرحی که ماکزیمم هزینه بر روی تمامی سناریوها را مینیمم کند به‌عنوان طرح نهایی انتخاب می‌شود.

- در طراحی دینامیک تکنیک سناریو ممکن است منجر به تصمیمات موفق متناقض شود (CIGRE, 1995, 143).

### ۵-۳. آنالیز تصمیم‌گیری

در آنالیز تصمیم‌گیری، طراحان سعی می‌کنند که قابل انعطاف‌ترین طرح را برای طراحی دینامیکی انتخاب کنند. قابلیت انعطاف، به‌عنوان توانایی تطابق طرح توسعه طراحی شده با تغییرات ممکن آینده با در نظر گرفتن هزینه‌های منطقی است. در این روش تمامی مجموعه سناریوها در طول دوره‌های مختلف افق طراحی به‌وسیله یک درخت رویداد، توضیح داده شده است ( Dekrajangpetch, 2000, 142). این درخت دو نوع گره دارد: گره‌های تصمیم‌گیری و گره‌های رخداد. درخت رخداد از یک گره تصمیم‌گیری شروع می‌شود. تصمیمات در گره‌های تصمیم‌گیری گرفته می‌شود. شاخه‌هایی که از گره تصمیم‌گیری خارج می‌شوند، تصمیمات ممکن که می‌تواند در این گره گرفته شود را نشان می‌دهد. هر یک از این شاخه‌ها وابسته به هزینه‌های تصمیم متناظر با آن است و به یک گره رخداد ختم می‌شود. شاخه‌هایی که از هر گره رخداد خارج می‌شود، حوادث احتمالی که ممکن است رخ دهد را نشان می‌دهد و وابسته به احتمال رخداد آنهاست. در حقیقت یک سناریو، یک مسیر کامل بین ریشه‌های درخت و گره نهایی است. پروسه یافتن تصمیم بهینه بر روی تمامی دوره طراحی، یک برنامه‌ریزی دینامیکی تصادفی کلاسیک است. برای تعیین اولین تصمیم بهینه، از انتهای درخت رخداد شروع می‌کنیم. هزینه پیش‌بینی شده هر مسیر را از نقطه‌های انتهایی تا نقطه‌های تصمیم‌گیری یکی مانده به آخر محاسبه می‌کنیم. اولین تصمیم بهینه، استراتژی هزینه مینیمم در اولین نقطه تصمیم‌گیری است. آنالیز تصمیم‌گیری منجر به آسان‌ترین تطابق با حوادث آینده می‌شود.

### ۶-۳. تصمیم‌گیری فازی

تصمیم‌گیری فازی برای مدل کردن اطلاعات مبهم و نامعلوم گسترش پیدا کرده است. بنابراین، به‌منظور مدنظر قرار دادن نامعلومی‌های سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته در طراحی توسعه انتقال، استفاده می‌شود. روش تصمیم‌گیری فازی به‌صورت مراحل زیر است (Buygi, 2004, 2060 و Buygi, 2003, 7 و Buygi, 2004, 427 و Buygi, 2004, 433 و Buygi, 2006 و Buygi, 2012, 220 و Buygi, 2004, 563 و 1379):

- مساله تصمیم‌گیری: شامل ۱. تعیین مجموعه راه‌های تصمیم‌گیری و ۲. تعیین مجموعه ملاک‌های تصمیم‌گیری؛

- ارزش‌گذاری مجموعه فازی از روش‌های تصمیم‌گیری: شامل ۱. انتخاب مجموعه‌های مشخص‌کننده میزان الویت برای اهمیت وزن‌های ملاک‌های تصمیم‌گیری و درجات تناسب راه‌های تصمیم‌گیری در مقابل ملاک‌های تصمیم‌گیری و ۲. محاسبه شاخص تناسب فازی به وسیله مجموع اهمیت وزن‌های ملاک‌های تصمیم‌گیری و درجات تناسب راه‌های تصمیم‌گیری؛
- انتخاب راه بهینه: شامل ۱. اولویت‌بندی راه‌های تصمیم‌گیری به‌وسیله شاخص‌های رتبه‌بندی فازی و ۲. انتخاب طرح توسعه با بالاترین اولویت به‌عنوان راه بهینه.

### ۴. روش‌های طراحی توسعه انتقال قطعی

روش‌های طراحی توسعه انتقال قطعی، معمولاً برای بدترین شرایط سیستم قدرت به کار می‌رود. در این شرایط، سیستم معمولاً برای بار پیک بررسی می‌گردد. روش قطعی در طراحی توسعه انتقال استاتیک و دینامیک به کار گرفته شده‌اند. روش قطعی دارای حجم محاسبات و پیچیدگی کمتری نسبت به مسایل طراحی غیرقطعی است. مساله طراحی دینامیک نیز معمولاً به‌صورت طراحی قطعی در نظر گرفته می‌شود، زیرا ابعاد مساله طراحی دینامیک بزرگ است و وارد کردن عدم قطعیت‌ها در آن به حجم محاسبات می‌افزاید. در بیشتر روش‌های قطعی در محیط‌های سنتی، تابع هدف به‌صورت مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های قطع بار در نظر گرفته می‌شود، قیود این مساله نیز محدودیت‌های پخش بار DC یا AC است. برای حل این مساله نیز روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی و ابداعی به کار گرفته شده است.

در محیط‌های تجدید ساختار نیز روش قطعی بسیار به کار رفته است با این تفاوت که طراحان و سرمایه‌گذاران اهداف مختلفی را دنبال می‌کنند. به‌طور کلی اهداف افزایش رفاه اجتماعی ( de la Torre, 2008, 238)، افزایش درآمد شبکه انتقال برای عبور توان الکتریکی (Xu, 2006, 326)، افزایش انعطاف‌پذیری شبکه انتقال ( Fu, 2006, 8)، کاهش هزینه تراکم (Fu, 2006, 8) و افزایش قابلیت اطمینان سیستم که معمولاً با یکی از معیارهای ارزش بار قطع شده (Xu, 2006, 326)، یا مقدار انرژی فراهم نشده مورد انتظار (Braga, 2005, 1631) و یا هزینه قطع بار (Silva, 2006, 7) و (Silva, 2006, 1565 و Xie, 2007, 1420) لحاظ می‌شود در مسایل قطعی طراحی توسعه انتقال در محیط‌های تجدید ساختار مطرح شده است. اهداف بالا باید در کنار مینیمم شدن هزینه‌های طراحی توسعه انتقال در نظر گرفته شوند تا بهترین طرح با کمترین هزینه در فضای جست‌وجو به‌دست آید. بنا به اهداف تعیین شده از

(Villasana, 1985, 349). آنالیز حساسیت نیز یکی از الگوریتم‌های ابداعی است که هدف آن، این است که مشخص نماید که آیا اضافه کردن خطوط جدید برای بهبود کیفیت طراحی لازم است (Bennon, 1982, 53). مشکل روش‌های ابداعی این است که این روش‌ها از لحاظ ریاضیاتی پایدار و ثابت نیستند و ممکن است نتایج برای سیستم‌های با مقیاس بزرگ از کیفیت خوبی برخوردار نباشند، زیرا پروسه‌های جست‌وجوی محلی، معمولاً منجر به بهینه محلی می‌شوند. بنابراین، روش‌های ابداعی، بهینه کلی را به دست نمی‌دهند.

#### ۳-۱-۴. روش‌های فوق ابداعی

روش‌های فوق ابداعی، ترکیبی از صورت‌های روش‌های ابداعی بهینه‌سازی هستند. این روش‌ها معمولاً منجر به راه‌حل‌هایی با کیفیت بالا برای شبکه‌های انتقال بزرگ با زمان محاسبات کم می‌شوند. در سال‌های اخیر، روش‌های فوق ابداعی غیرمحدب نظیر الگوریتم ژنتیک (Jingdong, 1997, 338)، شبیه‌سازی بازپخت (Romero, 1996, 364) و جست‌وجوی ممنوعه (TS) (da Silva, 2001, 62)، به‌طور گسترده برای حل مسایل طراحی توسعه انتقال به‌کار گرفته شده‌اند. الگوریتم ژنتیک توسط مجموعه‌ای از نقاط اولیه، مقداردهی اولیه می‌شوند، در حالی که شبیه‌سازی بازپخت و TS از یک نقطه اولیه شروع می‌شود. بنابراین الگوریتم ژنتیک قدرت حل مسایل طراحی توسعه انتقال چندهدفه را دارد.

#### ۴-۲-۴. طراحی توسعه انتقال دینامیک

هدف طراحی توسعه انتقال حداقل‌سازی ارزش فعلی تمامی سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در طول سالیان افق طراحی است. طراحی توسعه انتقال دینامیکی معمولاً نیاز به حجم محاسباتی زیادی دارد و اغلب به چند زیر مساله استاتیکی تجزیه می‌شود (Bahiense, 2001, 560). به‌طور کلی روش‌های حل مسایل طراحی توسعه انتقال به دو گروه زیر طبقه‌بندی می‌گردد:

۱. بهینه‌سازی ریاضیاتی، ۲. بهینه‌سازی فوق ابداعی.

#### ۱-۲-۴. روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی

چندین روش بهینه‌سازی سنتی مانند برنامه‌ریزی خطی (Kim, 1988, 1494)، برنامه‌ریزی غیرخطی (Youssef, 1989, 9)، برنامه‌ریزی درجه دوم (El-Abiad, 1973, 230) و برنامه‌ریزی دینامیکی (El-Abiad, 1973, 230)، برای حل مسایل طراحی توسعه انتقال دینامیکی ارایه شده است. اما دوباره، به دلیل حجم

سوی سرمایه‌گذاران و فرمول‌بندی مساله طراحی توسعه، روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای حل آن‌ها ارایه شده است که این روش‌ها در دو بخش طراحی استاتیک و دینامیک به‌طور مجزا تشریح شده است.

#### ۴-۱-۱. طراحی توسعه انتقال استاتیک

تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای حل مساله طراحی توسعه انتقال توسط تحقیقات زیادی ارایه شده است. به‌طور کلی این تحقیقات در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی، روش‌های ابداعی و روش‌های فوق ابداعی.

#### ۴-۱-۱. روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی

هدف طراحی توسعه انتقال در محیط سنتی، تأمین بار به‌طور اقتصادی همراه با ارضای قیود قابلیت اطمینان است. قیود قابلیت اطمینان معمولاً به‌وسیله ملاک امنیت خروج خط ارزیابی می‌شود (مثلاً ملاک امنیت  $N - 1$ ). بنابراین، طراحی توسعه انتقال به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی با حداقل‌سازی هزینه به‌عنوان تابع هدف نسبت به مجموعه قیود قابلیت اطمینان، فنی، تکنیکی و اقتصادی مدل می‌شود. مسایل طراحی توسعه انتقال به‌وسیله برخی از تکنیک‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و عدد صحیح آمیخته حل شده‌اند (Villasana, Bahiense, 2001, 560 و Al-Hamouz, 2002, 50 و 1985, 349 Binato). علاوه بر روش‌های کلاسیک، تکنیک‌های تجزیه ریاضیاتی مانند تجزیه بندرز (Binato, 2001, 235)، برای حل مساله طراحی توسعه انتقال به‌کار رفته است. الگوریتم‌های دیگری مانند روش نقطه داخلی که روش حل بهتری نسبت به برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و «شاخه و قید» (Haffner, 2000, 149) هستند، برای حل مساله طراحی توسعه به‌کار گرفته شده‌اند. متأسفانه، روش‌های ریاضیاتی با مشکل سرعت محاسباتی برای حل مسایل با مقیاس بزرگ مواجه هستند. علاوه بر این، راه‌حل به دست آمده به‌واسطه محدودیت ذاتی پروسه جست‌وجو، معمولاً به‌صورت بهینه محلی است.

#### ۴-۱-۲. روش‌های ابداعی

یک روش متداول برای حل مساله طراحی توسعه انتقال روش‌های ابداعی هستند که در واقع تکنیک‌های ابداعی با در نظر گرفتن تجارب مهندسی می‌باشند. بنابراین، عملکرد محاسباتی و نرخ همگرایی بهتری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی کاملاً ریاضیاتی دارند. یکی از اولین روش‌های ابداعی توسط گارور ارایه شد

مجموعه‌ای از سناریوهای آینده با درجه اهمیت یا درجه رخداد تعیین می‌گردد. سپس چند طرح برای غلبه بر این رخدادهای طراحی می‌گردد. بهترین طرح، به عنوان طرح بهینه انتخاب می‌گردد. برخی از معیارهای به کار گرفته شده برای انتخاب طرح بهینه عبارتند از: آنالیز ریسک، مقاومت، لاپلاس، هرویتز، وون نیومن مورگنسترن و مقاومتی  $\beta$ . معیارهای مختلف، معمولاً نگرش‌های مختلف طراح یا سرمایه‌گذار را نسبت به ریسک، منعکس می‌کنند. پس طرح نهایی همواره از تجارب و دانش سرمایه‌گذار یا طراح نسبت به سیستم قدرت تأثیر می‌پذیرد.

### ۳-۵. پیش‌بینی قیمت طرف عرضه و پیش‌بینی بار طرف تقاضا

پیش‌بینی بار و قیمت با الگوریتم طراحی توسعه انتقال متناسب است. دلیل آن بسیار واضح است، زیرا الگوی پخش بار همواره از قیمت و بار تأثیر می‌پذیرد. در همین زمان، الگوی پخش بار بر طرح توسعه نهایی اثر می‌گذارد. یک پیش‌بینی اشتباه، موجب سرمایه‌گذاری زیاد و یا کم در شبکه انتقال خواهد شد. قیمت الکتریسیته، یک عنصر حیاتی در طراحی توسعه انتقال است. یک پیش‌بینی خوب از قیمت آینده، توانایی یافتن یک طرح توسعه خوب و قطعی را افزایش می‌دهد. بنابراین، پیش‌بینی قیمت، یک ابزار باارزش محسوب می‌گردد. چندین روش برای پیش‌بینی قیمت وجود دارد، مانند: تابع تبدیل، شبکه‌های عصبی مصنوعی. یک عنصر ضروری دیگر در طراحی توسعه انتقال، پیش‌بینی بار است که برحسب مدت زمان افق طراحی طبقه‌بندی می‌گردد: پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت، پیش‌بینی بار میان‌مدت و پیش‌بینی بار درازمدت. پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت و میان‌مدت معمولاً یک پروسه مجتمع و متمرکز در طراحی توسعه انتقال است. با توجه به ویژگی این روش‌ها، نه طبقه را می‌توان به آنها اختصاص داد: رگرسیون چندگانه، مسطح سازی نمایی، روش حداقل مربعات باز وزن‌دهی شده، پیش‌بینی بار تلفیقی، (ARMAX)، سری‌های زمانی، منطق فازی، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های خبره.

### ۴-۵. ارزیابی قابلیت اطمینان و ارزیابی اقتصادی

ارزیابی‌های اقتصادی و قابلیت اطمینان نیز در طراحی توسعه انتقال ضروری هستند. ارزیابی اقتصادی طراحی توسعه انتقال با اندازه‌گیری منفعت اقتصادی که با توسعه انجام گرفته حاصل شده، به دست می‌آید. منفعت اقتصادی طراحی توسعه انتقال، بهبود در رقابت بازار و حذف

محاسباتی زیاد به واسطه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی، کاربرد آنها را در حل مسایل طراحی توسعه انتقال دینامیکی محدود نموده است.

### ۲-۴. روش‌های بهینه‌سازی فوق ابداعی

روش‌های فوق ابداعی مانند الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل طراحی توسعه انتقال دینامیکی به کار رفته است، زیرا دارای توانایی یافتن راه‌حلهایی با کیفیت بالا در سیستم‌های پیچیده با مقیاس بزرگ را دارند. در مرجع (Escobar, 2004, 735 و Youseef, 2001, 857 و Wang, 2001, 1737)، الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است. در مرجع (Fonseka, 2002, 250)، یک روش ترکیبی از الگوریتم ژنتیک، TS و شبیه‌سازی بازپخت برای حل مساله طراحی توسعه انتقال ارائه شده است. به کارگیری TS در مراحل تکثیر الگوریتم ژنتیک از افتادن الگوریتم در مینیمم محلی جلوگیری می‌کند، در حالی که استفاده از شبیه‌سازی بازپخت، برای رسیدن به جواب با کیفیت‌تر احتمال بیشتری به دست می‌دهد.

### ۵. طراحی توسعه انتقال آینده

#### ۱-۵. عناصر ضروری برای طراحی توسعه انتقال آینده

طراحی توسعه انتقال باید تغییرات الگوی پخش بار غلبه نماید و یک سرمایه‌گذاری با بازگشت سریع انجام دهد و به بهبود شرایط اقتصادی کمک کند و بر شرایط محیط بازار غلبه نماید. بنابراین، ابزار تحلیلی جدید باید قادر به انتخاب طرح بهینه باشد، قیمت و بار آینده را پیش‌بینی نماید و یک ارزیابی صحیح و کامل از نتایج اقتصادی و مسایل قابلیت اطمینان انجام دهد. این ابزار باید اهداف آنالیز سناریوهای آینده، پیش‌بینی قیمت طرف عرضه، پیش‌بینی بار طرف تقاضا، ارزیابی اقتصادی و ارزیابی قابلیت اطمینان را تأمین نماید (Lee, 2006, 257).

#### ۲-۵. آنالیز سناریوهای آینده

مساله ریسک، به تغییر نتایج و حوادث نامطلوب و غیرمنتظره بازمی‌گردد. آنالیز ریسک یک روش مطمئن برای بررسی عدم قطعیت‌ها برای کاهش ریسک است. خیلی از روش‌های طراحی توسعه انتقال از این روش استفاده کرده‌اند. جزئیات تکنیک سناریو در (Buygi, 2003, 7 و Buygi, 2012, 220) آمده است. در ابتدا

## ۶. نتیجه‌گیری

بعد از بررسی دسته‌بندی روش‌های توسعه انتقال در سیستم‌های سنتی و جدید، و بررسی خصوصیات آن می‌توان نتیجه گرفت خصوصیات سیستم‌های توسعه انتقال به‌طور کامل متفاوت از سیستم‌های قدرت قانونمند است. تجدید ساختار عدم قطعیت‌ها را شدیداً افزایش داده و بنابراین طراح انتقال را با ریسک بزرگی مواجه نموده است. برای محاسبه ریسک سرمایه‌گذاری، روش‌های احتمالی باید برای طراحی توسعه انتقال، گسترش یابد. تعیین معاملات تأمینی و در نظر گرفتن آنها در طراحی توسعه انتقال برای کاهش توصیه سفارش شده است. به‌عبارت دیگر، تجدید ساختار اهداف طراحی توسعه انتقال را تغییر داده است. تأمین یک محیط بدون تبعیض، هدف اصلی طراحی توسعه انتقال در محیط تجدید ساختار است. برای رسیدن به اهداف جدید، ملاک‌هایی براساس بازار باید در طراحی توسعه انتقال تعریف شود. رقابت، تبعیض، رفاه اجتماعی و قابلیت اطمینان باید در تعریف ملاک‌های جدید مدنظر قرار گیرند.

قدرت بازار، با فراهم آوردن محیطی با دسترسی یکسان برای متقاضیان و تولیدکنندگان، است. همانند محیط‌های سنتی، ملاک‌های قابلیت اطمینان قطعی مانند ملاک‌های امنیتی خروج خط (مثلاً ملاک‌های امنیتی  $n - 1$ ) و ملاک‌های تعادل بار، هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بیان کنند که سیستم انتقال باید در مسیری توسعه یابد که سیستم توسعه‌یافته به‌طور متناسب و با ظرفیت لازم در محیط تجدید ساختار یافته عمل نماید. اما، نیازهای قابلیت اطمینان به‌دلیل تجدید ساختار، تغییر یافته است. ملاک‌های قطعی قابلیت اطمینان نمی‌توانند کیفیت سرویس‌دهی به مشتری و احتمال پیشامدها را ارزش‌گذاری نمایند. نتیجتاً، ملاک‌های قابلیت اطمینان غیرقطعی مانند ملاک‌های قابلیت اطمینان احتمالی به‌وجود آمدند. در بازار برق نیز، قابلیت اطمینان می‌تواند از طریق اقتصادی نیز ارزش‌گذاری گردد. تابع زیان مشتری یکی از روش‌هایی است که بیانگر زیان‌های اقتصادی است که در نتیجه مشکلات قابلیت اطمینان به مشتری تحمیل می‌گردد.



## منابع

13. Buygi, M.O.; Shahidehpour, M. & Shanechi, H.M. (2004), "Market based transmission planning under uncertainties," Conf. on Probabilistic methods, pp. 563-568.
14. Buygi, M.O.; Shanechi, H.M.; Balzer, G. & Shahidehpour, M. (2006), "Network planning in unbundled power system," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 21, pp. 1379-1387.
15. Buygi, M.O.; Zareipour, H. & Rosehart, W.D. (2012), "Impacts of large-scale integration of intermittent resources on electricity markets," IEEE Power Syst., pp. 220-232.
16. CIGRE WG 37.10 (1995), "Methods for planning under uncertainty: toward flexibility in power system development," Electra, No. 161, pp. 143-163.
17. CIGRE T.F. 38.05.08 (2000), "Techniques for power system planning under uncertainties," Technical Brochure, Ref. 154.
18. Dekrajangpetch, S. & Sheble, G.B. (2000), "Application of auction results to power system expansion," IEEE Conf. on Restructuring, pp. 142-146.
19. El-Abiad, A.H. & Dusonchet, Y.P. (1973), "Discrete optimization and the planning of electric power networks," IEEE Trans, Vol. CT-20, pp. 230-238.
20. El-Metwally, M. & Harb, A. (1993), "Transmission planning using admittance approach and quadratic programming," Electric power systems, Vol. 21, pp. 69-83.
21. Escobar, A.H., Gallego, R.A. (2004), "Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, pp. 735-744.
22. Fang, R. & Hill, D.J. (2003), "A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets," IEEE Transaction on power systems, Vol. 18, No.1 pp. 374-380.
23. Fonseka, J. & Miranda, V. (2002), "A hybrid meta-heuristic algorithm for transmission expansion planning," Conf. Probabilistic, pp. 250-262.
24. Fu, R.; Wei, P.; Jiang, G.; Zhou, X. & Wan, Q. (2006), "New market power driven multistage transmission expansion strategy in power market," IEEE Power Eng., pp.8.
25. Haffner, S.; Monticelli, A.; Garcia, A. & Mantovani, J. (2000), "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model," Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., Vol. 147, pp. 149-56.
1. صمدی، مهدی (۱۳۸۸)، «توسعه شبکه انتقال در محیط تجدید ساختار یافته برای افق چند ساله»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
2. Abdelaziz, A.R. (2000), "Genetic algorithm based power transmission expansion planning," IEEE international Conf. on electronics and system, Vol. 2, pp. 642-645.
3. Al-Hamouz, Z.M. & Al-Faraj, A.S. (2002), "Transmission expansion planning using nonlinear programming," IEEE Power Eng. Conf., Vol. 1, pp. 50-55.
4. Bahiense, L. & Oliveira, G.C. (2001), "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 16, pp. 560-565.
5. Bennon, R.J.; Juves, J.A. & Meliopoulos, A.P. (1982), "Use of sensitivity analysis in automated transmission planning," IEEE Trans. Power Syst., pp. 53-59.
6. Beshir, M.J. (1999), "Probabilistic based transmission planning and operation criteria development for the western systems," IEEE Power Eng., Vol. 1, pp. 134-139.
7. Binato, S. & Pereira, M.V.F. (2001), "A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 16, pp. 235-240.
8. Braga, A.S.D. & Saraiva, J.T. (2005), "A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs computation," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, pp. 1631-1639.
9. Buygi, M.O.; Shahidehpour, M. & Shanechi, H.M. (2003), "Transmission planning approaches in restructured power systems," IEEE Power Conf., Vol. 2, pp. 7.
10. Buygi, M.O.; Balzer, G. & Shanechi, H.M. (2004), "Market based transmission expansion planning," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, pp. 2060-2067.
11. Buygi, M.O. & Shahidehpour, M. (2004), "Market based transmission expansion planning: fuzzy risk assessment," IEEE Conf. on Deregulation, Vol. 2, pp. 427-432.
12. Buygi, M.O. & Shahidehpour, M. (2004), "Market based transmission expansion planning: stakeholders' desires," IEEE Conf. on Deregulation, Vol. 2, pp. 433-438.

38. Silva, I.J.; Rider, M.j. (2006), "Genetic algorithm of Chu and beasley for static and multistage transmission expansion planning," IEEE power engineering, pp.7.
39. Silva, I.J. & Rider, M.j. (2006), "Transmission network expansion planning considering uncertainty in demand," IEEE Trans power Syst., Vol. 21, pp. 1565-1573.
40. Torre, T. De La.; Feltes, J.W. (1999), "Deregulation, privatization, and competition: transmission planning under uncertainty," IEEE Trans. PWRs, Vol. 14, No. 2, pp. 460-465.
41. Torre, S. de La.; Conejo, A.J. & Contreras, J. (2008), "Transmission expansion planning in electricity markets," IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, pp. 238-248.
42. Villasana, R.; Garver, L.L. & Salon, S.J. (1985), "Transmission network planning using linear programming," IEEE Trans. Power Appar. Syst., pp. 349-356.
43. Wang, X.L. & Wang, X.F. (2001), "Improved genetic algorithm for optimal multistage transmission system planning," IEEE Power Eng Conf., Vol. 3, pp. 1737-1742.
44. Ward, C.; Bell, K.; May, A. & Roddy, P. (2000), "Transmission capacity planning in an open energy market," CIGRE, No. 37-109.
45. Xie, M.; Zhong, J. & Wu, F.F. (2007), "Multiyear transmission expansion planning using ordinal optimization," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No 4, pp. 1420-1428.
46. Xu, Z.; Dong, Z.Y. & Wong, K.P. (2006), "Transmission Planning in a deregulated environment," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 153, No. 3, pp.326-324.
47. Youseef, H.K.M. (2001), "Dynamic transmission planning using a constrained genetic algorithm," Int. J. of Electr. Power Energy Syst., Vol. 23, pp. 857-862.
48. Youssef, H.K. & Hackam, R. (1989), "New transmission planning model," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 4, pp. 9-18.
49. Zadeh, S.J.; Hosseini, S.H.; Derafshian, M.; Dehghan, S.H. & Akbari, S. (2010), "A mixed-integer LP approach considering the impact of bundled conductors on transmission network expansion planning," (ICEE), pp. 938-943.
26. Jingdong, X. & Guoqing, T. (1997), "The application of genetic algorithms in the multi-objective transmission network planning," Conf. on Power Syst., pp. 338-341.
27. Kim, K.J. & Park, Y.M. (1988), "Optimal long term transmission expansion planning based on maximum principle," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 3, pp. 1494-1501.
28. Latorre, G.; Cruz, R.D. & Areiza, J.M. (2002), "Classification of publications and models on transmission expansion planning," IEEE PES transmission conf., Brazil, pp. 938-946.
29. Lee, C.W.; Simon, K.K.; Ng, J.; Zhong & Wu, F.F. (2007), "Transmission expansion planning from past to future," IEEE power systems, pp. 257-265.
30. Leite da Silva, A.M. (1990), "Probabilistic load flow techniques applied to power system expansion planning," IEEE Trans. PWRs, Vol. 5, No. 4, pp. 1047-1053.
31. Levi, V.A. & Calovic, M.S. (1991), "A new decomposition based method for optimal expansion planning of large transmission networks," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 6, pp. 937-943.
32. Maghouli, P.; Hosseini, S.H.; Buygi, M.O. & Shahidehpour, M. (2009), "A multi-objective framework for transmission expansion planning in deregulated environments," IEEE Transactions on power systems, Vol. 24, pp. 1051-1061.
33. Maghouli, P.; Hosseini, S.H.; Oloomi, M.; Buygi, M.O. & Shahidehpour, M. (2010), "A scenario-based multi-objective model for multi-stage transmission expansion planning," IEEE transactions on power systems, Vol. 26, pp. 470-478.
34. Miranda, V. & Proenca, L.M. (1998), "Probabilistic choice vs. risk analysis—conflicts and synthesis in power system planning," IEEE Trans. PWRs, Vol. 13, No. 3, pp. 1038-1043.
35. Miranda, V. & Proenca, L.M. (1998), "Why risk analysis outperforms probabilistic choice as the effective decision support paradigm," IEEE Trans. PWRs, Vol. 13, No. 2, pp. 643-648.
36. Romero, R. & Gallego, R.A. (1996), "Transmission system expansion planning by simulated annealing," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 11, pp. 364-369.
37. Silva, E.L. da, Ortiz, J.M.A. (2001), "Transmission network expansion planning under a tabu search approach," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 16, pp. 62-68.