PSC 2005
98-F-PTL-544

جدول ۱۲- ردیف ۳۱

بیستمین کنفرانس
بین المللی برق
20th International
Power System Conference

یک استراتژی و روش جدید برای توسعه شبکه انتقال در ساختار رقابتی صنعت برق

غلامرضا کامیاب
دانشجوی دکتری برق دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران و عضو هیئت علمی واحد گناباد

حبیب رجبی مشهدی
استادیار گروه برق
دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

با همکاری دفتر تحقیقات و استانداردها - برق منطقه ای خراسان

واژه‌های کلیدی: استراتژی توسعه انتقال، شبکه انتقال، بازار رقابتی، قدرت بازار

چکیده

شبکه انتقال در بازار برق رقابتی نقش مهمی ایفا می کند. در یک محیط رقابتی، بایستی همه شرکت کنندگان در بازار از امکان دسترسی به شبکه انتقال برخوردار باشند. در ساختار جدید صنعت برق مساله توسعه شبکه انتقال بر مبنای هدف کلی فراهم نمودن فضای رقابتی جهت خرید و فروش انرژی الکتریکی مورد توجه محققین قرار گرفته است. بدیهی است روشهای متداول برای توسعه انتقال در محیطهای رقابتی مناسب نیستند. زیرا رفتار بازار را مدل نمی کنند. در این مقاله یک استراتژی جدید برای توسعه انتقال پیشنهاد می شود. در این استراتژی هدف اصلی ایجاد قابلیت حداکثر رقابت (یک بازار رقابتی تا حد ممکن کامل) بوده و حداقل سازی هزینه سرمایه گذاری خطوط جدید، اولویت دوم در برنامه ریزی می باشد. همچنین یک روش جدید برای رسیدن به اهداف فوق ارائه می گردد. یک ویژگی مهم روش پیشنهادی عدم نیاز به دانستن اطلاعات هزینه تولید واحدهای تولید، مقادیر احتمالی میزان تولید واحدها و همچنین رفتار احتمالی بازیگران می باشد، در این روش توسعه شبکه انتقال به گونه ای طرح ریزی می شود که هر ترکیبی از تولید واحدها به شرطی که توانائی پاسخگوئی به حداکثر بار سیستم را داشته باشد، از دیدگاه شبکه انتقال قابل تحقق بوده و همه قیود انتقال رعایت می شوند. استراتژی و روش پیشنهادی بر روی یک شبکه تست ۶ باسه (شبکه Garver) پیاده شده و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

شبکه انتقال در بازار برق رقابتی نقش مهمی ایفا می کند. در یک محیط رقابتی، شبکه انتقال باید برای همه شرکت کنندگان در بازار امکان دسترسی یکسان به منظور خرید و فروش برق را فراهم نماید. بعبارت دیگر شبکه انتقال بایستی میدان مناسبی برای رقابت در بازار برق ایجاد کند. اگر ساختار شبکه انتقال از استحکام مناسبی برخوردار باشد، پیشنهاد

دهندگان قیمتها، از نقاط دور و نزدیک در خرید و فروش انرژی به رقابت با یکدیگر می پردازند و بدین وسیله از اعمال قدرت بازار (market power) توسط برخی از شرکت کنندگان که بصورت افزایش قیمت برق به دلیل ایجاد تراکم در شبکه انتقال بروز می کند، جلوگیری می شود.

در مساله طرح توسعه شبکه انتقال، چگونگی توسعه و تقویت شبکه انتقال موجود مورد بررسی قرار می گیرد. اقتصادی بودن طرح توسعه شبکه و رعایت قیود فنی بهره برداری از ویژگیهای اصلی شبکه انتقال می باشند. طرح شبکه انتقال یک مساله بسیار پیچیده است. در این مساله از یک طرف باید توپولوژی عملی شبکه و حق عبور شبکه از املاک مختلف بعنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شود. از طرف دیگر باید محدودیتهای پیچیده ای نظیر محدودیتهای غیر خطی سطح ولتاژ و یا محدودیتهای غیر جبری (معادلات دیفرانسیل در مساله پایداری) در نظر گرفته شوند. لذا معمولا مساله طرح شبکه انتقال در دو مرحله انجام می گیرد[۱۰]. مرحله اول، مرحله تعیین آرایش طرح (Scheme Formation) می باشد. در این مرحله یک یا چند آرایش انتخاب می شود بطوریکه هزینه کمتری داشته و نیازمندیهای انتقال قدرت را با توجه به ظرفیت مورد نیاز برآورده سازد. در این مرحله عموما محل و زمان و نوع خطوط انتقالی که باید احداث گردند، مشخص می شود. مرحله دوم، مرحله ارزیابی طرح است. در این مرحله، طرحهای منتخب مرحله قبل ارزیابی می گردد و مطالعات پخش بار، آنالیز پایداری، بررسی ظرفیت جریان اتصال کوتاه، قابلیت اطمینان و محاسبات اقتصادی انجام می شود. از آنجائیکه تئوری ها و الگوریتمهای مورد نیاز در مرحله دوم شناخته شده هستند در مساله طرح توسعه انتقال معمولا فقط به مرحله اول پرداخته می شود. در این مقاله نیز فقط مرحله اول مد نظر می باشد.

مساله توسعه انتقال اولین بار توسط Garver در سال ۱۹۷۰ مطرح گردید[۱] و از آن پس تکنیکهای متنوعی نظیر شاخه و کران [۲]، آنالیز حساسیت [۳]، تجزیه بندرز [۴]، شبیه سازی ذوب فلزات [۵] و الگوریتمهای ژنتیک [۶] برای مطالعه مساله توسعه انتقال ارائه گردیدند. مدلهای ارائه شده عمدتا برای سیستمهای قدرت در محیط انحصاری و تنظیم شده (regulated) می باشد. بدیهی است این روشها برای محیطهای بازار رقابتی مناسب نیستند و بر اساس حداقل سازی هزینه و رعایت قیود فنی فرمولبندی می شوند. در محیطهای انحصاری چون هزینه تولید هریک از واحدها مشخص است؛ بار به گونه ای بین واحدها تقسیم می شود که کمترین هزینه بهره برداری را داشته باشیم. بنابراین بر مبنای این تابع هدف و با توجه به معادلات پخش بار، توانهای عبوری از خطوط مشخص هستند. ولی در محیطهای رقابتی میزان تولید واحدها مشخص نیست. در این محیطها میزان تولید هر واحد توسط آن واحد تولیدی و با توجه به قیمتهای پیشنهادی خرید و فروش در بازار مشخص می شود که به عوامل متعددی بستگی دارد و قابل پیش بینی کامل نیست. در سالهای اخیر مساله برنامه ریزی توسعه انتقال در سیستمهای قدرت تجدید ساختار شده مورد توجه قرار گرفته است [۷ و۸ و ۹]. در مقاله مرجع [۷] روشهای برنامه ریزی انتقال در سیستمهای قدرت تجدید ساختار شده بیان شده است. در این مرجع به عدم قطعیت های (Uncertainities) ایجاد شده در مساله برنامه ریزی انتقال در سیستمهای تجدید ساختار شده اشاره شده است. عدم قطعیت در موارد مختلفی مانند بار و قیمت پیشنهادی برای توان عرضه شده، نحوه چرخش معاملات، قابلیت دسترسی به ژنراتورها و خطوط قابل بررسی است. در این مرجع همچنین به اهداف مطرح در مساله برنامه ریزی انتقال اشاره گردیده است که مهمترین آنها تشویق رقابت برای شرکت کنندگان در بازار برق، ایجاد دسترسی بدون تبعیض به تولید ارزان برای همه مشتریان، ایجاد یک شبکه انتقال مستحکم (Robust) در مقابل همه عدم قطعیت ها می باشد. در مرجع مزبور بیان شده است که با توجه به افزایش عدم قطعیت در سیستمهای تجدید ساختار شده باید آنالیز ریسک انجام شده و طرحی که کمترین ریسک را دارد بعنوان با استحکام ترین طرح برای توسعه انتقال انتخاب شود. در این مقاله همچنین خلاصه برخی از تحقیقات انجام شده

قبلی در زمینه برنامه ریزی توسعه انتقال در سیستمهای تجدید ساختار شده معرفی و مرور شده اند.

علاوه بر مراجع زیادی که در مرجع [۷] معرفی و مرور شده اند، در مراجع دیگر نظیر [۸ و۹]، نیز روشهائی برای مساله برنامه ریزی توسعه انتقال در محیطهای بازار رقابتی ارائه شده اند. اساس این روشها بر پایه مدلسازی احتمالاتی و یا غیر احتمالاتی کمیتهای مختلف بازار (نظیر میزان تولید و یا تابع هزینه واحدهای تولید) می باشد. این مراجع برای دستیابی به مقادیر احتمالی و یا غیر احتمالی تولید واحدها، اقدام به مدلسازی رفتار آینده بازار نموده اند. بدیهی است که مدلسازی دقیق رفتار آینده بازار و دانستن قیمتهای پیشنهادی تولیدکنندگان و مصرف کنندگان در یک بازار رقابتی، نیاز به اطلاعات زیادی دارد که به سادگی امکان پذیر نمی باشد.

در این مقاله یک استراتژی جدید برای توسعه انتقال پیشنهاد می شود. در این استراتژی اولین هدف ایجاد یک بازار (تا حد ممکن) رقابتی کامل می باشد و هدف دوم حداقل سازی هزینه های سرمایه گذاری برای خطوط انتقال جدید است. برای پیاده سازی استراتژی مزبور یک روش جدید ارائه می شود. روش جدید اجازه می دهد که میزان تولید واحدها بین صفر و حداکثر ظرفیتشان تغییر کنند یعنی بسته به وضعیت بازار در هر شرایط هر ترکیب از تولید واحدها می تواند وجود داشته باشد فقط شرط برابری مجموع تولید با مجموع بار باید برقرار باشد. با این فرض، توسعه شبکه انتقال چنان طرح ریزی می شود که بتوان حداکثر بار را با هر ترکیب دلخواهی از تولید واحدها تامین نمود. بدین ترتیب یک محیط کاملا رقابتی ایجاد می شود. ممکن است طرح های زیادی شرایط فوق را برآورده سازند. لذا بر طبق روش پیشنهادی آن طرحی که کمترین هزینه سرمایه گذاری را دارد، انتخاب می شود.

در بخشهای بعدی مقاله ابتدا مساله برنامه ریزی توسعه انتقال توصیف شده و با یک مثال انگیزه استراتژی پیشنهادی برای آن ارائه می شود. سپس استراتژی و روش پیشنهادی و مراحل مختلف آن بیان می شود. در بخش بعد از آن، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم قدرت نمونه پیاده سازی می شود و نتایج آن بیان می گردد. در انتهای مقاله هم نتایج حاصل از کل مقاله ارائه می گردد.

۲- توصیف مساله و انگیزه پیشنهاد استراتژی جدید

مساله برنامه ریزی توسعه انتقال یک مساله بهینه سازی است که هدف آن تعیین تعداد و محل خطوط انتقال جدید مورد نیاز یک سیستم قدرت است بطوریکه کمترین هزینه سرمایه گذاری را داشته باشیم. قیود این مساله شامل برقراری معادلات پخش بار و محدودیتهای بهره برداری سیستم نظیر محدودیتهای توانهای انتقالی خطوط هستند.

مساله برنامه ریزی توسعه انتقال از نظر افق برنامه ریزی به دو دسته دینامیک و استاتیک تقسیم می شود. در نوع دینامیک افق برنامه ریزی یک افق بلند مدت است و در آن پارامترهای اقتصادی مانند ارزش زمانی سرمایه، تورم و ... در مدل درنظر گرفته می شوند. در نوع استاتیک که بیشتر مورد توجه مهندسین قدرت می باشد، برنامه ریزی روی یک افق کوتاه مدت (یک تا سه سال) انجام می شود. در این مقاله برنامه ریزی استاتیک مد نظر می باشد.

مدل ریاضی مرسوم مساله برنامه ریزی استاتیک که در بسیاری از مقالات از جمله مرجع [۸] بکار رفته است، به شکل رابطه (۱) بیان می شود:

$$\text{Minimize Cost} = \sum c_{ij} n_{ij} + \sum \alpha_j r_i \qquad (1a)$$

$$\text{Subject to: } s^T p + g + r = d \qquad (1b)$$

$$p_{ij} = (B^{\circ}_{ij} + B_{ij})(\theta_i - \theta_j) \qquad (1c)$$

$$|p_{ij}| = (B^{\circ}_{ij} + B_{ij})\overline{p}_{ij} \qquad (1d)$$

$$0 \le g \le \overline{g} \qquad (1e)$$

$$0 \le r \le d \qquad (1f)$$

$$B_{ij} = n_{ij} B^{\circ}_{ij} \qquad (1g)$$

$$0 \le n_{ij} \le \overline{n_{ij}} \qquad \forall (i,j) \in \Omega \qquad (1h)$$

که

c_{ij} هزینه افزودن یک مدار به شاخه i-j؛

n_{ij} تعداد مدارهای افزوده شده به شاخه i-j؛

α_i ضریب جریمه مربوط به قطع بار در باس i به سبب فقدان ظرفیت انتقال؛

r_i میزان بار قطع شده در باس iام که بصورت یک واحد تولید مجازی در آن باس در نظر گرفته می شود؛

s ماتریس تلاقی گره و شاخه؛

p بردار توانهای اکتیو جاری در خطوط؛

g بردار توانهای اکتیو تولیدی واحدها؛

r بردار بار قطع شده در باسها؛

d بردار بار پیش بینی شده در باسها؛

B_{ij} مجموع سوسپتانس مدارهای اضافه شده به شاخه i-j؛

B_{ij}^0 سوسپتانس اولیه موجود در شاخه i-j؛

θ_i زاویه ولتاژ در باس iام؛

$\overline{p}_{ij}$ حد بالای توان قابل انتقال از شاخه i-j؛

$\overline{g}$ بردار حداکثر ظرفیت تولید؛

$\overline{n}_{ij}$ حداکثر تعداد مدارهای جدید که می توان به شاخه i-j اضافه نمود؛

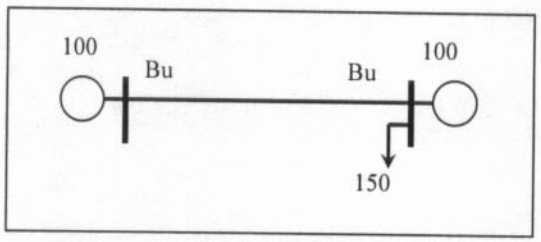
Ω مجموعه همه مدارهای کاندید برای اضافه شدن؛

تابع هدف (1a) شامل هزینه های سرمایه گذاری خطوط انتقال جدید و هزینه های قطع بار ناشی از کمبود ظرفیت انتقال می باشد که باید حداقل شود. با توجه به انتخاب ضریب جریمه بزرگ، پاسخ بهینه مساله فوق، طرح توسعه ای برای سیستم انتقال ارائه می کند که حداقل هزینه سرمایه گذاری را داشته و همزمان بار تغذیه نشده صفر باشد. قیود (1b) و (1c) معادلات پخش بار DC برای سیستم قدرت توسعه یافته را نشان می دهند. شایان ذکر است که معادلات پخش بار DC، معادلات خطی هستند. قیود (1d)، (1e) و (1f) محدودیتهای بهره برداری را بیان می کنند و قیود (1g) و (1h) درستی متغیرهای تصمیم را تضمین می کنند.

مدل فوق و مدلهای مشابه برای برنامه ریزی سیستم قدرت در محیطهای انحصاری و تنظیم شده (Regulated) می باشند. در محیط انحصاری، استراتژی توسعه انتقال بر اساس یک روش قطعی (Deterministic) برای بدترین سناریوی ممکن می باشد. بدترین سناریو معمولا با داشتن شرایط حداکثر بار و وجود سخت ترین اغتشاش تعیین می شود و برنامه ریزی به منظور داشتن کمترین هزینه انجام می شود.

اما ساختار مساله برنامه ریزی در یک محیط رقابتی کاملا تغییر می کند. استراتژی پیشنهادی این مقاله برای برنامه ریزی توسعه انتقال در محیط رقابتی، ایجاد شرایط حداکثر رقابت می باشد. برای درک بهتر انگیزه مطرح شدن این استراتژی، مثال زیر را که در مرجع [۷] بیان شده، مورد توجه قرار می دهیم.

بعنوان مثال شکل (۱) را درنظر بگیرید. فرض کنید قرار است ژنراتور باس ۲ با حداکثر ظرفیت ۱۰۰ مگاوات در آینده نصب شود و بار پیش بینی شده در آینده ۱۵۰ مگاوات می باشد. می خواهیم بدانیم برای اتصال دو باس، چه تعداد مدار خط انتقال لازم است. حداکثر ظرفیت هر مدار خط انتقال ۵۰ مگا وات فرض می شود. سطوح تولید در هر دو باس مجازاند از صفر تا حداکثر ظرفیتشان تغییر کنند و قیمت فروش برق ژنراتور باس ۲، ارزانتر از قیمت فروش برق ژنراتور باس ۱ است.



شکل (۱) دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت نمونه

اگر توسعه انتقال سیستم فوق بر طبق معیار محیطهای انحصاری صورت گیرد، می توان فقط یک خط ۵۰ مگاوات بین دو باس احداث نمود زیرا با احداث این خط هم حداکثر بار توسط دو ژنراتور (۱۰۰ مگاوات توسط ژنراتور باس ۱ و ۵۰ مگاوات توسط ژنراتور باس ۲) قابل تامین است و هم اینکه هزینه سرمایه گذاری توسعه انتقال حداقل خواهد بود. البته در اینجا فرض می شود که قابلیت اطمینان کافی باشد چرا که برای افزایش قابلیت اطمینان می توان دو خط ۵۰ مگاوات و یا حتی بیشتر احداث نمود که در اینصورت

ظرفیت اضافی نصب شده که در بیشتر مواقع استفاده نمی شود و هزینه برق را بالا می برد.

اما روش فوق برای تامین بار برای بازار رقابتی برق اقتصادی نیست. زیرا با وجود اینکه قیمت پیشنهادی ژنراتور باس ۲ کمتر است ولی بعلت کمبود ظرفیت خط، این امکان وجود ندارد که از حداکثر ظرفیت این ژنراتور استفاده شود. بنابراین با روشهای متداول طرح توسعه انتقال نمی توان رفتار بازار را مدل نمود. در یک بازار رقابتی، توزیع توان بین ژنراتورها بر اساس قیمت پیشنهادی می باشد.

برای سیستم مثال فوق، اگر توسعه انتقال از دیدگاه ایجاد یک بازار رقابتی مدنظر باشد؛ باید یک خط انتقال که توانائی عبور ۱۰۰ مگاوات (یک خط ۱۰۰ مگاوات یا دو خط ۵۰ مگا وات) را داشته باشد، بین دو باس احداث شود. در اینصورت هزینه سرمایه گذاری طرح دو برابر می شود ولی یک بازار رقابتی ایجاد می شود و امکان اعمال قدرت بازار از ژنراتور باس ۱ گرفته می شود و برق با قیمت ارزانتر دراختیار مشتریان قرار می گیرد. با استراتژی پیشنهادی در این مقاله، توسعه انتقال طوری صورت می گیرد که تا حد امکان یک بازار رقابتی کامل ایجاد شود و از طرفی هزینه سرمایه گذاری توسعه شبکه هم حداقل شود.

۳- استراتژی پیشنهادی

استراتژی جدید که در این مقاله برای توسعه انتقال پیشنهاد می شود بر این مبنا است که اولا یک بازار (تا حد امکان) رقابتی کامل ایجاد شود و ثانیا کمترین هزینه سرمایه گذاری ممکن را داشته باشیم. یعنی شبکه انتقال جدید به گونه ای طرح می شود که به ازای هر میزان تولید ژنراتورها (به شرط برابری مجموع تولید و مصرف)، قابلیت سرویس دهی به بار را داشته باشد. ضمنا هزینه سرمایه گذاری برای توسعه خطوط جدید هم حداقل باشد. علت انتخاب این استراتژی این است که امکان استفاده از حداکثر ظرفیت تولید کنندگان مختلف سیستم را ایجاد می کند و بدین ترتیب می توان اولا از مزیت نسبی واحدهای تولید استفاده نمود و هزینه های بهره برداری را کاهش داد و ثانیا امکان بکارگیری قدرت بازار توسط تولید کنندگان را کاهش داد.

به منظور نائل شدن به اهداف فوق یک روش جدید برای برنامه ریزی توسعه انتقال ارائه می کنیم. ابتدا فرضیات روش جدید را بشرح زیر مرور می کنیم:

الف) ساختار شبکه انتقال موجود، پارامترهای فیزیکی آن و مقادیر ظرفیت ژنراتورهای متصل به باسهای شبکه انتقال معلوم فرض می شوند.

ب) افق برنامه ریزی یکسال در نظر گرفته می شود.

ج) میزان بار هر باس شبکه انتقال برای سال بعد مشخص است. یعنی برنامه ریزی توسعه شبکه برای یک سناریوی مشخص از بار سیستم انجام می شود. شایان ذکر است که این فرض محدود کننده نمی باشد چرا که به سادگی می توان روش پیشنهادی را برای یک مجموعه ای از سناریوهای مشخص بار اجراء نمود و جواب بهینه را بدست آورد.

اکنون مراحل طراحی با روش جدید به شرح زیر معرفی می گردد:

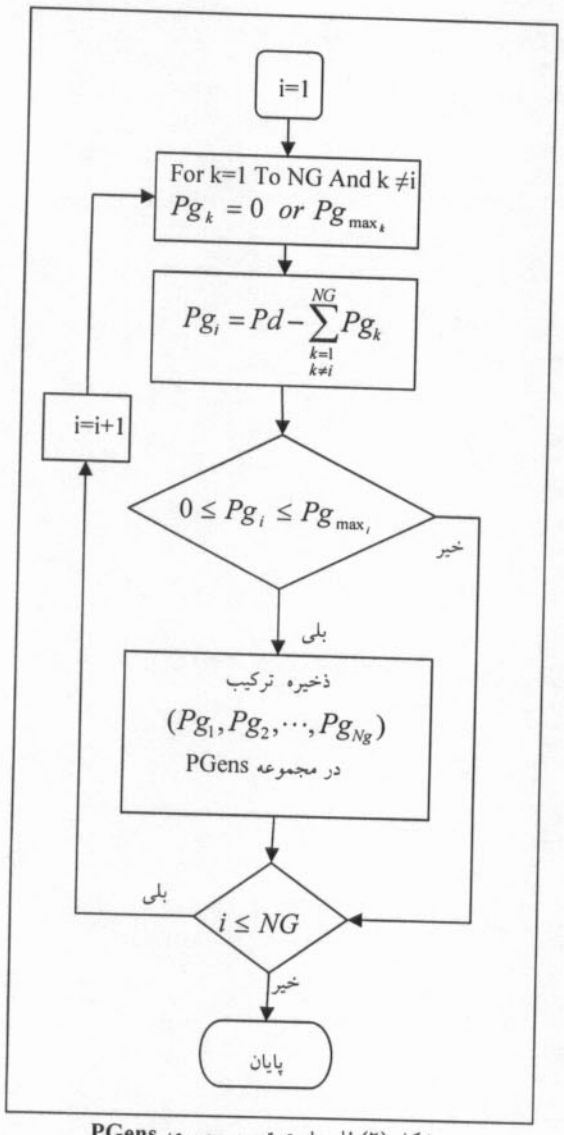
مرحله الف:

مجموعه ای از طرحهای شدنی (Feasible) توسعه برای انتقال را تشکیل می دهیم و این مجموعه را مجموعه طرحها (Plans) می نامیم. در هر یک از این طرحها، تعداد خطوط جدید همراه با ظرفیت هر خط و هزینه سرمایه گذاری مورد نیاز آن مشخص است. در نهایت هدف این است که بهترین طرح انتخاب شود.

مرحله ب:

در بازار رقابتی مقادیر تولید ژنراتورها متغیر هستند. فرض می کنیم مقدار تولید هر ژنراتور بین صفر و حداکثر ظرفیت اش قابل تغییر باشد. مجموعه ای از همه ترکیبهائی که از مقادیر حدی فوق ایجاد می شوند بطوریکه مجموع تولیدها برابر مجموع حداکثر بار شود، را تشکیل می دهیم و با نام مجموعه ترکیبهای حدی ممکن تولید (PGens) نام گذاری

می کنیم. هر عضوی از مجموعه PGens یک ترکیب حدی از توانهای تولیدی ژنراتورها است. در هر ترکیب حدی، توان تولیدی NG-1 ژنراتور یکی از مقادیر حدی حداقل و یا حداکثر تولید آن ژنراتور (۰ و یا $p_{G\max}$)را دارد و توان تولیدی تک ژنراتور باقیمانده، ژنراتور مبنا، برابر تفاضل حداکثر بار سیستم و مجموع تولید NG-1 ژنراتور قبلی است. البته به شرطی که توان تولیدی این ژنراتور در محدوده مجازاش قرار گیرد. NG، تعداد کل ژنراتورهای سیستم است. بدیهی است با توجه به نحوه قیمت دهی ژنراتورها و نوع بازار ممکن است یکی از ترکیبهای مجموعه PGens در بهره برداری واقعی رخ دهد. برای یافتن اعضای مجموعه PGens می توان از فلوچارت شکل (2) بهره گرفت. مطابق این فلوچارت ابتدا اولین ژنراتور بعنوان ژنراتور مبنا (i=1) انتخاب می شود. میزان تولید سایر ژنراتورها در یکی از مقادیر حدی شان در نظر گرفته شده و ترکیبهای مختلفی از آنها بدست می آید. مقدار تولید ژنراتور مبنا برابر تفاضل مجموع بار سیستم و مجموع تولید سایر ژنراتورها قرار داده می شود. در صورتیکه مقدار تولید ژنراتور مبنا در محدوده مجازاش قرار داشته باشد، آن ترکیب از تولید واحدها، یک ترکیب حدی ممکن است و ذخیره می شود. سپس مراحل قبل را با تغییر ژنراتور مبنا (i=1,2,...,NG) تکرار می کنیم تا تمامی ترکیبهای حدی تولید ژنراتورها بدست آید.



شکل (۲) فلوچارت تعیین مجموعه PGens

مرحله ج:

به ازای هر یک از طرحهای متعلق به مجموعه طرحها (Plans)، همه ترکیبهای مجموعه PGens مورد بررسی قرار می گیرند در این راستا بایستی پخش بار DC روی شبکه انجام شده و توانهای انتقالی خطوط آن طرح بدست آیند. در صورتیکه توانهای انتقالی بدست آمده از همه ترکیبها، در محدوده مجازشان قرار داشته باشند، آن طرح از نظر ایجاد بازار رقابتی مناسب است.

شایان ذکر است که چون معادلات پخش بار DC، معادلات خطی هستند، در حقیقت توانهای انتقالی خطوط، روابطی خطی از توانهای تولیدی NG-1 ژنراتور می باشند. توان اکتیو تولیدی ژنراتور مبنا از برابری مجموع تولید و مصرف مشخص است و متغیر مستقل نمی باشد. بنابراین توان اکتیو انتقالی از خط iام را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_{L_i} = \beta_i + \sum_{k=1}^{NG-1} \alpha_{ik} P_{G_k} \qquad (۲)$$

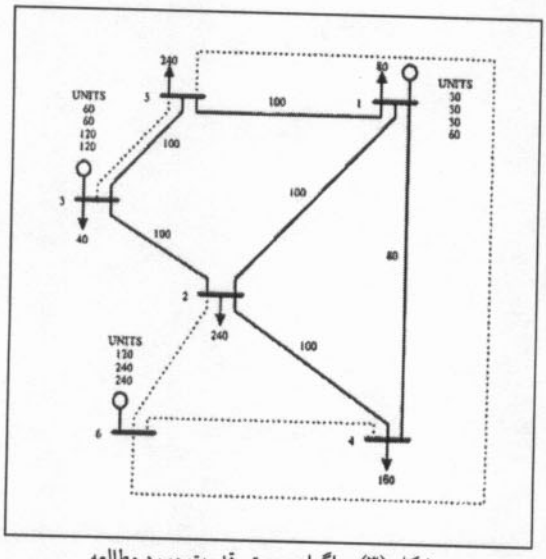
که P_{L_i} توان اکتیو انتقالی خط iام، P_{G_k} توان اکتیو تولیدی توسط ژنراتور kام و α_{ik} و β_i مقادیر ثابت هستند. با توجه به رابطه فوق بدیهی است که حداکثر مقدار P_{L_i} وقتی است که P_{G_k}ها در یکی از مقادیر حدی شان قرار داشته باشند. زیرا برای حداکثر شدن P_{L_i}، اگر α_{ik} مثبت باشد، باید P_{G_k} در حداکثراش قرار گیرد و اگر α_{ik} منفی باشد، باید P_{G_k} در حداقل مقداراش (صفر) قرار گیرد. بنابراین حداکثر توانهای انتقالی خطوط با استفاده از مقادیر حدی تولید ژنراتورها (یعنی همان اعضای مجموعه ترکیبهای حدی ممکن تولید PGens) بدست می آید لذا همه ترکیبهای حدی ممکن مجموعه PGens را درنظر گرفته و توانهای انتقالی خطوط را بدست می آوریم. اگر توانهای انتقالی بدست آمده در محدوده مجازشان باشند، توانهای انتقالی بدست آمده از هر ترکیب دیگری از تولید ژنراتورها (نه لزوما حدی) به دلیل خاصیت خطی بودن معادلات در محدوده مجاز خواهند بود.

مرحله د:

از میان طرحهای مناسب مرحله قبل، طرحی که کمترین هزینه سرمایه گذاری را داشته باشد بعنوان طرح بهینه برای توسعه انتقال انتخاب می شود.

۴- کاربرد روش پیشنهادی برای یک سیستم قدرت نمونه

استراتژی پیشنهادی این مقاله برای یک سیستم ۶ باسه تست (سیستم Garver) که در اکثر مقالات از جمله مرجع [۱] مطرح شده، مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۳) دیاگرام تک خطی این شبکه را نشان می دهد. شایان ذکر است که در این شکل خطوط مقطع، نشان دهنده خطوط انتقال جدید و خطوط توپر نشان دهنده خطوط انتقال موجود شبکه می باشند.



شکل (۳) دیاگرام سیستم قدرت مورد مطالعه

جدول (۱) اطلاعات خطوط موجود و خطوطی که بین باسهای قدیم و باسهای جدید قابل احداث اند را نشان می دهد.

برای بررسی این سیستم هر یک از چهار مرحله طراحی بخش قبل را به شرح زیر دنبال می کنیم:

مرحله الف: فرض می کنیم هر یک از خطوط جدول (۱)، تا چهار مدار قابل افزایش باشد. بنابراین خطوط موجود هر کدام ۴ حالت مختلف و خطوط جدید هر کدام ۵ حالت مختلف ایجاد می کنند. با این فرض، مجموعه طرحهای این سیستم یعنی مجموعه Plans را تشکیل می دهیم که $(4^6 * 5^3 =)512000$ طرح مختلف بدست می آید زیرا در این سیستم ۶ خط موجود و سه خط جدید داریم.

مرحله ب: مجموع حداکثر بارهای پیش بینی شده این سیستم ۷۶۰ مگاوات است و سیستم دارای سه ژنراتور (نیروگاه) است. می خواهیم مجموعه PGens را تشکیل دهیم. ابتدا مجموعه همه ترکیبهائی را تشکیل می دهیم که تولید دو ژنراتور از سه ژنراتور در مقادیر حداقل و یا حداکثر ظرفیتشان هستند و تولید ژنراتور سوم برابر تفاضل مصرف و مجموع تولید سایر واحدها است؛ این مجموعه در رابطه (۱) تشکیل شده است:

{ (760,0,0), (160,0,600), (400,360,0),
(−200,360,600), (0,760,0), (0,160,600),
(150,610,0), (150,10,600), (0,0,760),
(0,360,400), (150,0,610), (150,360,250) } (3)

مرحله ب: مجموع حداکثر بارهای پیش بینی شده این سیستم ۷۶۰ مگاوات است و سیستم دارای سه ژنراتور (نیروگاه) است. می خواهیم مجموعه PGens را تشکیل دهیم. ابتدا مجموعه همه ترکیبهائی را تشکیل می دهیم که تولید دو ژنراتور از سه ژنراتور در مقادیر حداقل و یا حداکثر ظرفیتشان هستند و تولید ژنراتور سوم برابر تفاضل مصرف و مجموع تولید سایر واحدها است؛ این مجموعه در رابطه (۱) تشکیل شده است:

{ (760,0,0), (160,0,600), (400,360,0),
(−200,360,600), (0,760,0), (0,160,600),
(150,610,0), (150,10,600), (0,0,760),
(0,360,400), (150,0,610), (150,360,250) } (3)

جدول (۱) اطلاعات خطوط سیستم قدرت مورد مطالعه

خطوط (از-به)	ظرفیت (Mw)	سوسپتانس (مهو)	هزینه (واحد پول)
۲-۱	۱۰۰	۲,۵	۴۰
۴-۱	۸۰	۱,۶۷	۶۰
۵-۱	۱۰۰	۵,۰	۲۰
۳-۲	۱۰۰	۵,۰	۲۰
۴-۲	۱۰۰	۲,۵	۴۰
۶-۲	۱۰۰	۳,۳۳	۳۰
۵-۳	۱۰۰	۵,۰	۲۰
۶-۴	۱۰۰	۳,۳۳	۳۰
۶-۵	۷۸	۱,۶۴	۶۱

همانطور که در فلوچارت شکل (۲) بیان شد، ژنراتور مبنا ثابت نمی باشد بلکه به ترتیب همه ژنراتورها بعنوان مبنا انتخاب می شوند. این موضوع در ترکیبهای رابطه (۳) ملاحظه می شود. در رابطه مزبور در چهار ترکیب اول، ژنراتور اول مبنا بوده و در چهار ترکیب دوم آن، ژنراتور دوم مبنا است و بالاخره در چهار ترکیب سوم، ژنراتور سوم مبنا در نظر گرفته شده است.

از مجموعه رابطه (۳) آن ترکیبهائی که غیر ممکن است؛ یعنی محدودیت توان تولیدی ژنراتور مبنا نقض شده است، را حذف می کنیم. بدین ترتیب فقط ۴ ترکیب از ۱۲ ترکیب فوق ممکن هستند و لذا مجموعه مقادیر حدی تولید ژنراتورها (PGens)، مطابق رابطه (۴) بدست آید:

PGens = { (0,160,600) , (150,10,600)
, (0,360,400) , (150,360,250) } (4)

مرحله ج: برای سیستم مورد مطالعه، به ازای هر یک از طرحهای مجموعه Plans، همه ترکیبهای مجموعه PGens را مورد بررسی قرار می دهیم یعنی پخش بار DC انجام می دهیم و توانهای انتقالی خطوط آن طرح بدست می آوریم. این کار انجام شد که در ۵۲۲۱۷ طرح از کل ۵۱۲۰۰۰ طرح موجود، توانهای انتقالی همه ترکیبها در محدوده مجازشان قرار داشتند، یعنی از نظر ایجاد بازار رقابتی مناسب بودند.

مرحله د: از میان طرحهای مناسب مرحله قبل، طرحی که کمترین هزینه سرمایه گذاری را دارد بعنوان طرح بهینه برای توسعه انتقال انتخاب می کنیم که بصورت زیر معرفی می شود:

Optimum Plan = {(0,0,0,2,0,4,3,3,0)}
Minimum Cost = 310

(5)

در رابطه فوق تعداد مدارهای اضافه شده به هر خط به ترتیب خطوط مندرج در جدول (۱) بیان شده است همچنین هزینه سرمایه گذاری طرح بهینه قید گردیده است.

جهت مقایسه، در مرجع [۱] طرح توسعه انتقال برای سیستم قدرت فوق توسط Garver در محیط انحصاری انجام شده است که نتیجه آن بصورت زیر است:

Optimum Plan = {(0,0,0,0,0,4,1,2,0)}
Minimum Cost = 200

(۶)

مشاهده می شود که در حالت انحصاری هزینه سرمایه گذاری کمتر است ولی در حالت رقابتی هزینه سرمایه گذاری بیشتر می شود که این افزایش هزینه به قیمت افزایش امکان حداکثر رقابت بوده است.

۵- نتایج

ازاین مقاله نتایج زیر حاصل می شود:

۱- روشهای متداول برای طرح توسعه شبکه انتقال در محیطهای رقابتی مناسب نیستند زیرا رفتار بازار را مدل نمی کنند.

۲- استراتژی پیشنهادی این مقاله، توسعه انتقال با هدف ایجاد یک بازار رقابتی (تا حد ممکن کامل) می باشد و داشتن کمترین هزینه سرمایه گذاری برای خطوط جدید هم هدف دوم آن است.

۳- یک روش جدید برای رسیدن به اهداف فوق ارائه گردید. با روش پیشنهادی نیازی نیست که هزینه تولید واحدهای تولید و یا مقادیر احتمالی میزان تولید واحدها را بدانیم و همچنین نیازی نیست که رفتار احتمالی بازار برق را مدل کنیم، بلکه در این روش توسعه شبکه انتقال چنان طرح می شود که داشتن هر ترکیبی از تولید واحدها را برای پاسخگوئی به حداکثر بار ممکن باشد.

۴- روش پیشنهادی چنان است که بوسیله آن جستجوی کامل و دقیق در همه طرحهای ممکن اولیه امکان پذیر است و لذا طرح بهینه حاصل از میان طرحهای اولیه، بهینه مطلق می باشد.

۵- یکی از ویژگیهای روش پیشنهادی سادگی و قابلیت پیاده سازی آن برای شبکه های بزرگ می باشد.

۶- بالا بودن هزینه نهائی طرح توسعه به قیمت افزایش قابلیت رقابت بسته به شرایط سیستم بایستی مورد تجزیه و تحلیل قرارگیرد. بعبارت دیگر در اینجا با یک مساله تصمیم گیری و مصالحه بین کاهش قدرت بازار ناشی از وضعیت شبکه انتقال و هزینه های توسعه، روبرو می باشیم. بدیهی است این تحقیق در قدمهای بعدی می تواند به طور عمیقتری به بررسی این مساله تصمیم گیری چند هدفی بپردازد.

۶- مراجع

[1] L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, Sept./Oct. 1970.

[2] S. T. Y. Lee, K. L. Hocks, and E. Hnyilicza, "Transmission expansion Of branch-and-bound integer programming with optimal cost-capacity curves," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-93, pp. 1390–1400, Aug. 1974.

[3] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Application of sensitivity analysis of load supplying capacity to interactive transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 381–389, Feb. 1985.

[4] S. Binato, M. V. Pereira, and S. Granville, "A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 235–240, May 2001.

[5] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 364–369, Feb. 1996.

[6] E. L. Silva, H. A. Gil, and J. M. Areiza, "Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 1168–1175, Aug. 2000.

[7] M. Oloomi Bugi, H. M. Shanechi, G. Balzer and M. Shahidehpour, "Transmission Planning Approches in Restructured Power Systems" *IEEE Bologna. Power Tech Conference.*, Bologna, Italy, June 23-26.

[8] R. Fang, and D. J. Hill, "A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, pp. 374–380, Feb. 2003.

[۹] حمدی عبدی، محسن پارسا مقدم، محمد حسین جاویدی، "روشی جدید برای برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال در بازارهای رقابتی"، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران، تهران، آبان ماه ۱۳۸۳.

[10] X. Wang, and J. R. McDonald, "Modern Power System Planning" McGraw-Hill Book Company Europe, pp. 376, 1994.