پیشنهاد قیمت بهینه در بازار برق با استفاده از تئوری بازی‌ها

ناصر بائی و محسن پارسا مقدم

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای استراتژی پیشنهاد قیمت در بازارهای نقطه‌ای برق ارائه شده است. یک روش بهینه‌سازی دوسطحی برای حداکثرسازی سود شرکت‌های غیرمشارکتی، با در نظر گرفتن تمام قیود شبکه به کار رفته است. در این روش نقاط تعادل بازار به عنوان تعادل نَش محاسبه شده‌اند. به منظور در نظر گرفتن رفتار تمام شرکت‌های بازار و در نتیجه محیط رقابتی‌تر، هم تولیدکنندگان و هم مصرف‌کنندگان به عنوان بازیکنان بازار در نظر گرفته شده‌اند. برای اجتناب از رسیدن به نقاط ماکزیمم محلی در بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. روش پیشنهادی برای سیستم ۹ شینه با نتایج رضایت‌بخش به کار رفته است.

کلید واژه: **بازارهای غیرمشارکتی، نقطه تعادل نَش، الگوریتم ژنتیک، پخش بار بهینه مستقیم (DCOPF).**

۱- مقدمه

در طول سال‌های متمادی شرکت‌های برق بر روی بهبود موارد اقتصادی طرف تولید صنعت متمرکز بوده‌اند. چندین دهه کوشش‌هایی برای حداقل‌کردن هزینه‌های تولید توانی که به مشتریان داده می‌شد، صورت گرفته است. به همین دلیل، توسعه به سمت یک بازار آزاد با پیشنهاد قیمت تولیدکننده از لحاظ مفهومی ساده است. اخیراً، با معرفی مفاهیم پاسخ تقاضا در سیستم‌های تجدیدساختارشده[1]، بازارها شروع به شرکت‌دادن رفتار طرف تقاضا از طریق پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده و/یا استراتژی‌های پیشنهاد قیمت طرف تقاضا (DSB)[2] کرده‌اند.

کارآیی یک بازار به وسیله یک مفهوم اقتصادی به نام منفعت عمومی[3] اندازه‌گیری می‌شود. منفعت عمومی ترکیبی است از قیمت کالا، در اینجا الکتریسیته، و فایده‌ای که کالا به جامعه، به عنوان پرداخت انتظاری، می‌رساند.

اگر تقاضا برای الکتریسیته مستقل از قیمت فرض شود، یعنی تقاضا نسبت به قیمت غیرکشسان است، در نتیجه منفعت عمومی به سادگی برابر مجموع مقدار پولی است که برای الکتریسیته پرداخت شده است. یک بازار ایده‌آل منفعت عمومی را حداکثر می‌کند. اگرچه بازارهای واقعی همیشه پایین‌تر از سطوح حداکثر منفعت عمومی عمل می‌کنند. اختلاف در منفعت عمومی بین یک بازار ایده‌آل و یک بازار واقعی یک معیار برای ناکارآمدی بازار واقعی است.

در یک بازار ایده‌آل، هر تولیدکننده توان یک قیمت‌گیرنده است. در تئوری اقتصاد، استراتژی پیشنهاد قیمت بهینه برای یک تولیدکننده به سادگی پیشنهاد قیمت حاشیه‌ای است. وقتی یک ژنراتور به دلیل غیر ایده‌آل‌بودن بازار، به منظور افزایش سود، قیمتی بالاتر از هزینه حاشیه‌ای پیشنهاد دهد، این رفتار پیشنهاد قیمت استراتژیک نامیده می‌شود. اگر ژنراتور بتواند با موفقیت سودش را افزایش دهد، یا به طریقی بتواند هزینه‌اش را کاهش دهد، در این حالت قدرت بازار[4] وجود دارد. بازارهای برق جدید کاملاً رقابتی نیستند، یک تولیدکننده می‌تواند سودش را با استفاده از قدرت بازار و از طریق پیشنهاد قیمت استراتژیک افزایش دهد.

به طور کلی، سه روش برای استراتژی‌های پیشنهاد قیمت بهینه وجود دارد. اولی بر اساس تخمین قیمت تعادلی بازار (MCP)[5] در دوره زمان بعدی می‌باشد [۱]. دومی بر اساس رفتار پیشنهاد قیمت شرکت‌های رقیب [۲] و سومی بر اساس تئوری بازی‌ها می‌باشد [۳]. از طرفی روش‌های شبیه‌سازی بازار و تحلیل تجربی نیز برای رفتار پیشنهاد قیمت استراتژیک استفاده می‌شود، اما این روش‌ها، روش‌های سیستماتیک برای پیشنهاد قیمت نمی‌باشند. بر اساس تخمین MCP، برای یک تولیدکننده توان خیلی ساده است که استراتژی پیشنهاد خود را به سادگی ارائه دهد، به این طریق که قدری پایین‌تر از MCP پیشنهاد دهد. اگرچه پیش‌بینی قیمت برق در یک بازار ائتلافی نیاز به تحلیلی دارد که ترکیبی از پیش‌بینی تقاضا به همراه درک پیشنهاد قیمت بقیه شرکت‌ها و تراکم سیستم انتقال می‌باشد. از آنجایی که اطلاعات کمی در بیشتر بازارها وجود دارد، و به دلیل تغییرات سریعی که در صنعت برق وجود دارد، رسیدن به پیش‌بینی صحیح مشکل است. مشکل دیگر این روش یک فرض ضمنی می‌باشد، یعنی پیشنهاد قیمت یک تولیدکننده MCP را تحت تأثیر قرار ندهد. از آنجایی که بازار برق اساساً چندانحصاری می‌باشد، این فرض بعید به نظر می‌رسد برای مدت قابل قبولی از زمان معتبر باشد. این روش به ندرت در استراتژی‌های پیشنهاد قیمت پیشرفته در بازارهای برق به کار می‌رود.

اگر در یک بازار تعداد تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان زیاد باشد و خروج یک تولیدکننده یا یک مصرف‌کننده تأثیری بر قیمت‌ها نداشته باشد، این بازار کاملاً رقابتی است. در چنین بازاری، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان ناگزیر از پیشنهاد قیمت حاشیه‌ای هستند، در غیر این صورت از بازار حذف می‌شوند [۴]. در بازارهای برق واقعی، تولیدکنندگان سعی در پیشنهاد قیمت بالاتر و مصرف‌کنندگان سعی در پیشنهاد قیمت پایین‌تر از قیمت حاشیه‌ای دارند.

در مقالات روش‌های مختلفی برای مدل‌کردن چنین رفتاری برای تولیدکنندگان پیشنهاد شده است. مرجع [۵] شیب یا عرض از مبدأ هزینه حاشیه‌ای را در یک ضریب k ضرب کرده است. در مرجع [۶] منحنی هزینه در یک ضریب k ضرب شده است. به هر حال کارهای ذکرشده در بالا فقط رفتار پیشنهاد قیمت تولیدکننده را در نظر می‌گیرد. در این مقاله ایده مرجع [۶] توسعه یافته است و رفتار مصرف‌کنندگان نیز در نظر گرفته

این مقاله در تاریخ ۲۲ مرداد ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۲۶ دی ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

ناصر بائی، شرکت ABB، خ. ولیعصر، روبروی پارک ملت، برج سایه، طبقه ۱۳، تهران، کد پستی ۱۹۶۷۷۱۳۶۴۶ (nasser_baei@yahoo.com).

محسن پارسا مقدم، گروه برق، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، کد پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵ (parsa@modares.ac.ir).

1. Restructured
2. Demand Side Bidding
3. Social Welfare
4. Market Power
5. Market Clearing Price

Archive of SID

www.SID.ir

شده است. مزیت یک چنین تلاشی به وجود آوردن محیطی رقابتی‌تر است که باعث می‌شود بازار به سمتی سوق داده شود که قیمت‌های نقطه‌ای و هزینه‌ها برای مصرف‌کنندگان پایین‌تر روند.

در رابطه با تولیدکنندگان ضریب k که در تابع هزینه ضرب می‌شود و واضح است که مقدار آن باید از ۱ بیشتر باشد، و اختلاف این مقدار از تابع هزینه مقدار سود می‌باشد، که در (۱۶) سعی در حداکثرکردن آن داریم. در رابطه با مصرف‌کنندگان یک تابع درجه دوم به شکل تابع هزینه تولیدکنندگان تعریف می‌شود که به آن تابع سود انتظاری گفته می‌شود. با دخیل‌کردن ضریب k که در اینجا کمتر از ۱ است، به مصرف‌کنندگان اجازه بازی یا به مفهوم دیگر تغییر پیشنهاد قیمت از قیمت انتظاری می‌دهیم و اختلاف این مقدار از مقدار انتظاری مقدار سود مصرف‌کنندگان می‌باشد، که در (۱۷) سعی در حداکثرکردن آن داریم.

۲- مدل‌سازی رفتار پیشنهاد قیمت شرکت‌های بازار

با توجه به اینکه در بازارهای برق شرکت‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده وجود دارند، و این شرکت‌ها برای حداکثرکردن سودشان با یکدیگر رقابت می‌کنند لذا رقابت‌کردن این شرکت‌ها برای رسیدن به سود حداکثر یک نوع بازی است و در این مقاله با استفاده از مفهوم تعادل نَش سعی در به دست آوردن سود حداکثر این شرکت‌ها شده است. با فرض ثابت‌بودن رفتار (استراتژی=در اینجا پیشنهاد قیمت) شرکت‌های رقیب، هر کدام از شرکت‌ها سعی در حداکثرکردن سود خود دارند. اگر پس از چندین بار تکرار حل مسئله برای هر کدام از شرکت‌ها به پیشنهاد قیمت ثابتی برسیم، این پیشنهاد قیمت‌ها ابعاد نقطه تعادل نَش را تشکیل می‌دهند.

شرکت‌دادن رفتار طرف تقاضا از طریق پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده موضوع تحقیقاتی در بازارهای برق تجدید ساختار شده بوده است. در اینجا نشان داده خواهد شد که فرمول‌بندی پخش بار بهینه (OPF) به راحتی قابل اصلاح بوده و می‌توان رفتار پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده را به موازات تولیدکننده در نظر گرفت. بنابراین، با یک مدل‌سازی مناسب، می‌توان رفتار تمام شرکت‌های بازار را در نظر گرفت. وقتی فقط توان اکتیو مورد نظر باشد، با استفاده از پخش بار بهینه مستقیم (DCOPF) محاسبات به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل کلی هزینه تولید را می‌توان به شکل زیر نمایش داد [۷]

$$C(s_G) = bs_G + cs_G^2 \quad [\$/\mathrm{h}] \qquad (۱)$$

که در آن s_G توان تولیدی ژنراتورها $C(s_G)$ هزینه تولید بر حسب واحد پول است.

با مشتق‌گیری از رابطه فوق و با در نظر گرفتن $p = \mathrm{d}\,C(s_G)/\mathrm{d}\,s_G$ به عنوان قیمت نقطه‌ای و به دست آوردن توان بر حسب قیمت، خواهیم داشت

$$s(p) = \frac{1}{2c}(p-b) = m_s(p - p_{\min}) \quad [\mathrm{MW}] \qquad (۲)$$

یا قیمت بر حسب توان تولیدی

$$p(s) = \frac{1}{m_s}s + p_{\min} \quad [\$/\mathrm{MWh}] \qquad (۳)$$

به طوری که، p قیمت نقطه‌ای و s توان تولید شده است. این معادله پیشنهاد قیمت هزینه حاشیه‌ای برای یک تولیدکننده نامیده می‌شود.

به همین روش می‌توان منحنی سود انتظاری مصرف‌کننده را تعریف کرد

$$B(d_l) = bd_l + cd_l^2 \quad [\$/\mathrm{h}] \qquad (۴)$$

به طوری که c مقدار منفی دارد و d_l توان مصرف‌کنندگان و $B(d_l)$ هزینه خرید بر حسب واحد پول است.

با مشتق‌گیری از این رابطه و با در نظر گرفتن $p = \mathrm{d}\,B(d_l)/\mathrm{d}\,d_l$ به عنوان قیمت نقطه‌ای و به دست آوردن توان تقاضاشده بر حسب قیمت خواهیم داشت

$$d(p) = \frac{1}{2c}(p-b) = -m_d(p - p_{\max}) \quad [\mathrm{MW}] \qquad (۵)$$

یا قیمت بر حسب توان تقاضاشده

$$p(d) = \frac{-1}{m_d}d + p_{\max} \quad [\$/\mathrm{MWh}] \qquad (۶)$$

در اینجا، p قیمت نقطه‌ای و d توان خریده‌شده یا تقاضاشده است. این رابطه پیشنهاد قیمت سود حاشیه‌ای برای یک مصرف‌کننده نامیده می‌شود.

برخورد منحنی‌های تولید (عرضه) و تقاضای بالا قیمت و مقدار توان را مشخص می‌کنند. حال اگر ما منحنی‌های پیشنهاد قیمت تولیدکننده و مصرف‌کننده را به ترتیب در ضرایب k_s و k_d ضرب کنیم، روابط زیر را خواهیم داشت

$$p(s) = k_s\left(\frac{1}{m_s}s + p_{\min}\right) \quad [\$/\mathrm{MWh}] \qquad (۷)$$

$$p(d) = k_d\left(\frac{-1}{m_d}d + p_{\max}\right) \quad [\$/\mathrm{MWh}] \qquad (۸)$$

روابط بالا رفتار پیشنهاد قیمت تولیدکننده و مصرف‌کننده را در بازارهای برق شرح می‌دهد. ضرایب k_s و k_d باید به گونه‌ای محاسبه شوند که سود تولیدکننده و مصرف‌کننده را حداکثر کنند. در یک بازار واقعی با چندین شرکت، نقطه تعادل بازار به عنوان یک نقطه تعادل نَش بر اساس تئوری بازی‌ها محاسبه می‌شود.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی

در این بخش یک روش بهینه‌سازی دو سطحی بر اساس الگوریتم ژنتیک (GA)[1] برای پیشنهاد قیمت شرکت‌های بازار پیشنهاد شده است. در سطح اول، ضرایب پیشنهاد قیمت k_s و k_d در سطح شرکت‌ها محاسبه می‌شوند، یعنی در سطح ژنراتورها و مصرف‌کنندگان، به طوری که سودشان حداکثر شود. در اینجا، یک روش تکرار گوس–سایدل[2] برای محاسبه پارامترهای فوق مورد استفاده قرار گرفته است. در هر مرحله سطح اول الگوریتم یک ضریب مشخص k_{si} یا k_{dj}، به روش تکرار با استفاده از GA از یک مقدار اولیه تغییر می‌کند، در حالی که بقیه ضرایب ثابت نگه داشته می‌شوند. مرحله نهایی این سطح نقطه تعادل نَش بازار را تعیین می‌کند.

در مرحله دوم بهینه‌سازی، اُپراتور مستقل سیستم[3] (IOS) سعی در حداکثرکردن مجموع سود تمام شرکت‌های بازار با استفاده از DCOPF به روش GA دارد.

بگذارید مسئله را برای یک سیستم با N باس، n ژنراتور و m

1. Genetic Algorithm
2. Guess-Seidel
3. Independent Operator System

Archive of SID
www.SID.ir

مصرف‌کننده توسعه دهیم. شکل کلی (۷) و (۸) بدین شکل در خواهند آمد

$$\begin{aligned} p(s_i) &= k_{si}(a_i s_i + b_i) \quad , \quad i = ۱,...,n \\ p(d_j) &= k_{dj}(c_j d_j + e_j) \quad , \quad j = ۱,...,m \end{aligned} \tag{۹}$$

در صورت عدم وجود تراکم[1] در خطوط، قیمت نقطه‌ای در تمام سیستم یکسان است

$$\begin{aligned} p(s_۱) = p(s_۲) = \ldots = p(s_n) = \\ p(d_۱) = p(d_۲) = \ldots = p(d_m) \end{aligned} \tag{۱۰}$$

$$\begin{aligned} k_{s۱}(a_۱ s_۱ + b_۱) = k_{s۲}(a_۲ s_۲ + b_۲) = \ldots = k_{sn}(a_n s_n + b_n) = \\ k_{d۱}(c_۱ d_۱ + e_۱) = k_{d۲}(c_۲ d_۲ + e_۲) = \ldots = k_{dm}(c_m d_m + e_m) \end{aligned} \tag{۱۱}$$

حال تمام توان‌های تولیدی و مصرفی را بر حسب یک توان تولیدی یا مصرفی مثلاً d_m به دست می‌آوریم

$$d_j = \frac{\frac{k_{dm}}{k_{dj}}(c_m d_m + e_m) - e_j}{c_j} \quad , \quad j = ۱,\ldots,m-۱ \tag{۱۲}$$

$$s_i = \frac{\frac{k_{dm}}{k_{si}}(c_m d_m + e_m) - b_i}{a_i} \quad , \quad i = ۱,\ldots,n \tag{۱۳}$$

در صورت صرف نظر کردن از تلفات سیستم خواهیم داشت

$$s_۱ + s_۲ + \ldots + s_n = d_۱ + d_۲ + \ldots + d_m \tag{۱۴}$$

با جایگذاری (۱۲) و (۱۳) در (۱۴) خواهیم داشت

$$d_m = \frac{[(k_{dm}e_m)(\sum_{i=۱}^{n}\frac{۱}{k_{si}a_i} - \sum_{j=۱}^{m-۱}\frac{۱}{k_{dj}c_j}) - \sum_{i=۱}^{n}\frac{b_i}{a_i} + \sum_{j=۱}^{m-۱}\frac{e_j}{c_j}]}{[(k_{dm}c_m)(-\sum_{i=۱}^{n}\frac{۱}{k_{si}a_i} + \sum_{j=۱}^{m-۱}\frac{۱}{k_{dj}c_j}) + ۱]} \tag{۱۵}$$

برای یک مجموعه از ضرایب پیشنهاد قیمت k_{si} و k_{dj}، می‌توان d_m، $s_i(i = ۱,\ldots,n)$ و $d_j(j = ۱,\ldots,m-۱)$ را به ترتیب از (۱۵)، (۱۳) و (۱۲) به دست آورد.

۳-۱ محاسبه ضرایب پیشنهاد قیمت بهینه

همان‌طور که قبلاً مطرح شد ضرایب پیشنهاد قیمت تولیدکننده k_{si} و مصرف‌کننده k_{dj} به وسیله یک روش بهینه‌سازی دوسطحی با استفاده از GA محاسبه می‌شوند. در سطح اول، پارامترهای فوق بگونه‌ای محاسبه می‌شوند که سود هر شرکت بازار حداکثر شود. فرمول‌بندی مسئله بدین شکل است

$$\max\ B_{si} = \frac{(۲k_{si} - ۱)}{۲}a_i s_i^۲ + (k_{si} - ۱)b_i s_i \ , \ i = ۱,\ldots,n \tag{۱۶}$$

$$\max\ B_{dj} = \frac{(۱ - ۲k_{dj})}{۲}c_j d_j^۲ + (۱ - k_{dj})e_j d_j \ , \ j = ۱,\ldots,m \tag{۱۷}$$

به طوری که

$$\sum_{i=۱}^{n} s_i = \sum_{j=۱}^{m} d_j \tag{۱۸}$$

$$s_{i\min} \le s_i \le s_{i\max} \quad i = ۱,\ldots,n \tag{۱۹}$$

$$d_{j\min} \le d_j \le d_{j\max} \quad j = ۱,\ldots,m \tag{۲۰}$$

در اینجا، B_{si} و B_{dj} به ترتیب توابع سود تولیدکننده iام و مصرف‌کننده j ام می‌باشند. برای حل مسئله بهینه‌سازی بالا یک روش GA چندمرحله‌ای تکرارشونده استفاده شده است، که در هر مرحله ضرایب پیشنهاد قیمت $k_s\,(k_d)$ مکرراً تصحیح می‌شوند. جواب‌های همگراشده برای ضرایب k ابعاد نقطه تعادل نَش می‌باشند.

در سطح دوم بهینه‌سازی، یک مسئله DCOPF به همراه بهینه‌سازی زیر حل می‌شوند. در این سطح، ISO سعی در حداکثرکردن سود تمام سیستم با در نظر گرفتن قیود شبکه انتقال دارد.

$$\begin{aligned} \max\ & \sum_{i=۱}^{n}\frac{(۲k_{si} - ۱)}{۲}a_i s_i^۲ + (k_{si} - ۱)b_i s_i + \\ & \sum_{j=۱}^{m}\frac{(۱ - ۲k_{dj})}{۲}c_j d_j^۲ + (۱ - k_{dj})e_j d_j \end{aligned} \tag{۲۱}$$

به طوری که

$$\sum_{i=۱}^{n} s_i = \sum_{j=۱}^{m} d_j \tag{۲۲}$$

$$s_{i\min} \le s_i \le s_{i\max} \quad i = ۱,\ldots,n \tag{۲۳}$$

$$d_{j\min} \le d_j \le d_{j\max} \quad j = ۱,\ldots,m \tag{۲۴}$$

$$|P_{km}| \le |P_{km\max}| \tag{۲۵}$$

به طوری که، P_{km} توان عبوری از خط بین باس‌های k و m می‌باشد.

۳-۲ بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک روش‌های جستجویی هستند که بر اساس انتخاب طبیعی بهترین‌ها از طبیعت پایه‌گذاری شده‌اند. یک GA با جمعیتی از جواب‌ها شروع شده و سعی در یافتن فضای جواب به وسیله به کار بردن بهترین‌های طبیعت دارد. مراحل مختلف یک GA عبارتند از: انتخاب، تقاطع و جهش. الگوریتم‌های ژنتیک کاربردهای گسترده‌ای در تحقیقات سیستم‌های قدرت برای کمک به حل مسائل مشکل دارند [۸] و [۹]. هر جمعیت شامل چندین کروموزوم و هر کدام از این کروموزوم‌ها شامل متغیرهای کنترل مسئله می‌باشند. در اینجا، کروموزوم‌ها شامل: تابع شایستگی (سود)، توان‌های تولیدی، توان‌های مصرفی، ضرایب k_s تولیدکنندگان و ضرایب k_d مصرف‌کنندگان می‌باشند. ساختار کروموزوم‌ها عبارتست از:

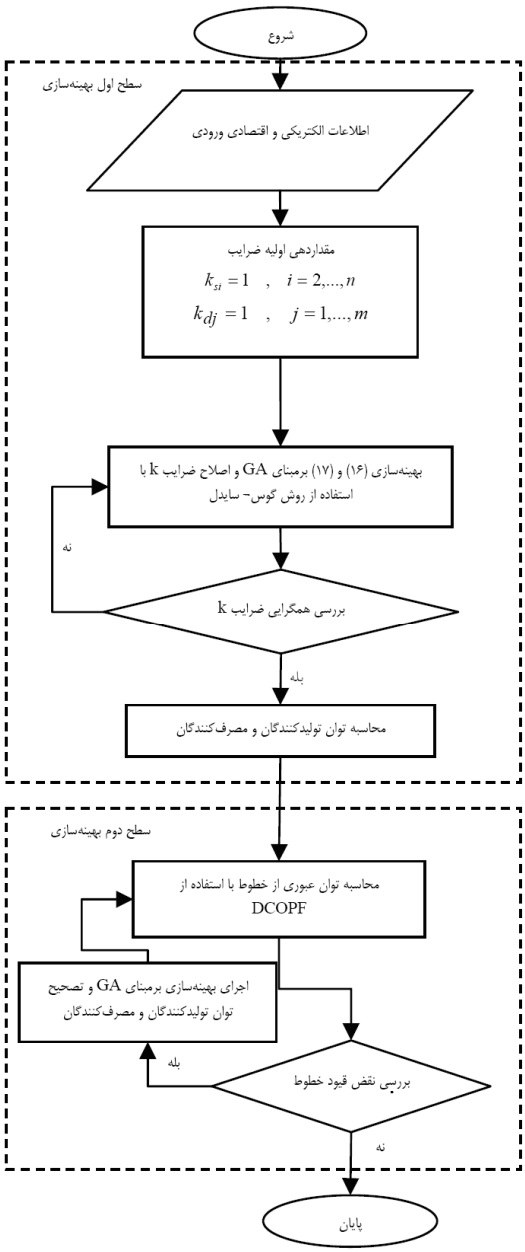
$$\begin{aligned} [fitness \ \ s_۱ \ \ldots \ s_n \ \ d_۱ \ \ldots \ d_m \\ k_{s۱} \ \ldots \ k_{sn} \ \ k_{d۱} \ \ldots \ k_{dm}] \end{aligned} \tag{۲۶}$$

در این مقاله، به جای استفاده از سیستم اعداد باینری از مقادیر دهدهی استفاده شده است، که این عمل محاسبات را خیلی سریع‌تر می‌کند. در دو سطح بهینه‌سازی از کروموزوم‌های یکسان همانند (۲۶) استفاده می‌کنیم. در هر مرحله از اولین سطح توان s (یا d) و ضرایب پیشنهاد قیمت k_s (یا k_d) یک تولیدکننده (یا مصرف‌کننده) به وسیله GA به طوری به دست می‌آید که سود مربوطه حداکثر شود، در حالی که بقیه ضرایب ثابت فرض شده‌اند. پروسه تا رسیدن به نقطه تعادل نَش ادامه می‌یابد، به طوری که مقادیر ضرایب k به دست می‌آیند. در سطح دوم توان‌های تولیدی و مصرفی شرکت‌های بازار طوری محاسبه می‌شوند تا ضمن در نظر گرفتن قیود سیستم، توابع شایستگی که در اینجا مجموع سود تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان می‌باشد حداکثر شود.

1. Congestion

Archive of SID

www.SID.ir



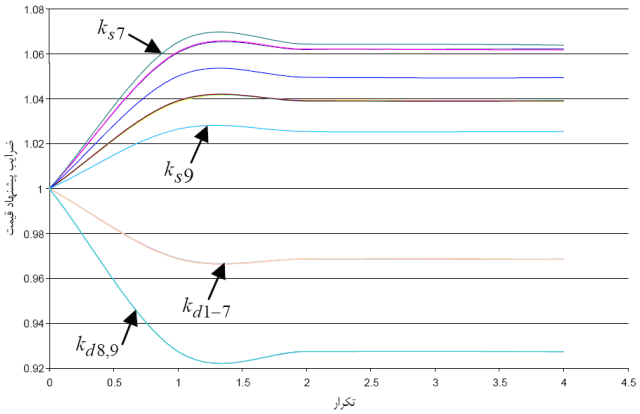
شکل ۱: فلوچارت بهینه‌سازی دوسطحی.

فلوچارت بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهادشده در شکل ۱ نشان داده شده است.

٤- مطالعات موردی

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مطالعات موردی با استفاده از سیستم ۹ شینه انجام شده است. پارامترهای این سیستم در [۱۰] آمده‌اند. در اینجا هر دو حالت عدم وجود و وجود تراکم در خطوط مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این سیستم ۹ ژنراتور و ۹ مصرف‌کننده وجود دارد.

مشخصات همگرایی ضرایب k به عنوان خروجی سطح اول بهینه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است $k_{s۷}$ بیشترین مقدار و $k_{s۹}$ کمترین مقدار را دارند. این به خاطر این حقیقت است که این دو ژنراتور به ترتیب دارای بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین ضرایب در منحنی‌های هزینه تولید می‌باشند. همچنین $k_{d۱-۷}$ دارای بیشترین و $k_{d۸,۹}$ دارای کمترین مقدار می‌باشند و این به دلیل ضرایب این بارها می‌باشد.



شکل ۲: ضرایب k بر حسب تکرار.

جدول ۱: توان‌ها و قیمت نقطه‌ای محاسبه‌شده در سطح دوم بهینه‌سازی.

باس	ولتاژ		تولید	تقاضا	λ ($/MWh)
	دامنه (pu)	فاز (Deg)	MW	MW	
۱	۱	۰	۲۶۸٫۴۱	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۲	۱	−۱٫۴۱۴	۲۶۸٫۴۱	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۳	۱	−۵٫۶۵۶	۱۷۶٫۴۵	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۴	۱	−۷٫۰۷	۱۷۶٫۴۵	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۵	۱	−۹٫۷۱۴	۱۷۶٫۴۵	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۶	۱	−۱۰٫۲۳۲	۱۷۶٫۴۵	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۷	۱	−۵٫۰۸۴	۲۷۸٫۴۱	۱۵۴٫۹۹	۴۷٫۵۳۲
۸	۱	−۱۵٫۷۶۳	۲۲۶٫۳۴	۳۸۸٫۸۹	۴۷٫۵۳۲
۹	۱	−۱۷٫۱۲۷	۱۱۵٫۳۴	۳۸۸٫۸۹	۴۷٫۵۳۲

توان تولیدی و مصرفی شرکت‌های بازار و قیمت نقطه‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ژنراتور ۷ بزرگ‌ترین تولیدکننده است و این مورد با توجه به شکل ۲ قابل پیش‌بینی بود. از آنجایی که در شبکه تراکمی وجود ندارد، قیمت نقطه‌ای در سیستم یکسان است. توان‌های عبوری از خطوط در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

حال فرض کنید که تراکم در خط واصل بین باس‌های ۷ و ۸ با محدوده توان عبوری به میزان ۱۵۰ MW وجود داشته باشد. در این حالت نتایج عددی در مرحله دوم بهینه‌سازی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت قیمت‌های نقطه‌ای در باس‌های مختلف تغییر کرده است، مخصوصاً در باس‌های ۷ و ۸.

٥- تأثیر وجود ضریب پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده

به منظور ارزیابی در نظر گرفتن ضریب پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده در مدل‌سازی مسئله، روش پیشنهادی با روش ارائه‌شده در [۶] مقایسه شده است. جدول ۵ نتایج ضرایب پیشنهاد قیمت دو روش را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورتی که ضرایب پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده در نظر گرفته شوند، ضرایب پیشنهاد قیمت تولیدکنندگان k_s کمتر از ضرایب مشابه در روش [۶] می‌باشند.

جداول ۶ و ۷ به ترتیب قیمت‌های نقطه‌ای در حالت عدم وجود و وجود تراکم خطوط را نشان می‌دهند.

واضح است که قیمت‌های نقطه‌ای روش پیشنهادی کمتر از قیمت‌های نقطه‌ای [۶] می‌باشند، و این نتیجه طبیعی داشتن محیط رقابتی‌تر به دلیل شرکت‌دادن رفتار مصرف‌کننده می‌باشد.

Archive of
www.SID.ir

جدول ۲: توان عبوری از خطوط.

توان عبوری	به باس	از باس
۲۴٫۶۸	۲	۱
۸۸٫۷۴	۷	۱
۷۴٫۰۴	۳	۲
۶۴٫۰۶	۷	۲
۲۴٫۶۸	۴	۳
۷۰٫۸۲	۵	۳
۴۶٫۱۴	۵	۴
۹٫۰۴	۶	۵
۱۲۹٫۳۹	۹	۵
−۸۹٫۸۵	۷	۶
۱۲۰٫۳۵	۹	۶
۱۸۶٫۳۷	۸	۷
۲۳٫۸۲	۹	۸

جدول ۳: توان‌ها و قیمت‌های نقطه‌ای محاسبه‌شده در سطح دوم بهینه‌سازی.

λ ($/MWh)	تقاضا MW	تولید MW	ولتاژ فاز (Deg)	ولتاژ دامنه (pu)	باس
۴۵٫۷۴	۱۶۴٫۲۳	۲۵۱٫۵۱	۰	۱	۱
۴۶٫۱۷۹	۱۶۱٫۹۷	۲۵۵٫۶۵	−۰٫۸۹۸	۱	۲
۴۷٫۴۹۶	۱۵۵٫۱۸	۱۷۶٫۲۱	−۳٫۹۵۸	۱	۳
۴۷٫۹۳۵	۱۵۲٫۹۱	۱۷۹٫۲۲	−۴٫۸۷۸	۱	۴
۴۸٫۳۷۴	۱۵۰٫۶۵	۱۸۲٫۲۴	−۷٫۳۰۴	۱	۵
۴۷٫۹۳۵	۱۵۲٫۹۱	۱۷۹٫۲۲	−۸٫۰۲۳	۱	۶
۴۵٫۳۰۱	۱۶۶٫۴۹	۲۵۷٫۳۶	−۴٫۱۰۳	۱	۷
۵۴٫۰۸۱	۳۸۱٫۸۵	۲۵۷٫۵۳	−۱۲٫۶۹۷	۱	۸
۵۰٫۱۳	۳۸۶٫۱	۱۳۳٫۳۵	−۱۴٫۱۶۸	۱	۹

جدول ۴: توان عبوری از خطوط.

توان عبوری	به باس	از باس
۱۵٫۶۷	۲	۱
۷۱٫۶۱	۷	۱
۵۳٫۴۲	۳	۲
۵۵٫۹۴	۷	۲
۱۶٫۰۵	۴	۳
۵۸٫۴	۵	۳
۴۲٫۳۵	۵	۴
۱۲٫۵۴	۶	۵
۱۱۹٫۸	۹	۵
−۶۸٫۴۲	۷	۶
۱۰۷٫۲۶	۹	۶
۱۵۰	۸	۷
۲۵٫۶۸	۹	۸

۶- نتایج و پیشنهادها

استراتژی پیشنهاد قیمت در یک سیستم تجدیدساختارشده در این مقاله ارائه شده است. در این مقاله نشان داده شده است که شرکت‌دادن طرف تقاضا می‌تواند یک محیط رقابتی‌تر را نتیجه دهد. با استفاده از یک روش

جدول ۵: ضرایب پیشنهاد قیمت دو روش.

روش [۶]	روش پیشنهادی	تکرار
۱٫۰۶۴۳	۱٫۰۶۲۱	k_{s1}
۱٫۰۶۴۳	۱٫۰۶۲۱	k_{s2}
۱٫۰۴	۱٫۰۳۹۱	k_{s3}
۱٫۰۴	۱٫۰۳۹۱	k_{s4}
۱٫۰۴	۱٫۰۳۹۱	k_{s5}
۱٫۰۴	۱٫۰۳۹۱	k_{s6}
۱٫۰۶۵۵	۱٫۰۶۴۳	k_{s7}
۱٫۰۵۰۲	۱٫۰۴۹۶	k_{s8}
۱٫۰۲۶۳	۱٫۰۲۵۴	k_{s9}

جدول ۶: قیمت نقطه‌ای بدون در نظر گرفتن تراکم.

λ ($/MWh)	
۴۷٫۵۳۲	روش پیشنهادی
۴۸٫۱۳۲	روش [۶]

جدول ۷: قیمت‌های نقطه‌ای با در نظر گرفتن تراکم.

روش [۶] λ ($/MWh)	روش پیشنهادی λ ($/MWh)	باس
۴۶٫۳۴۵	۴۵٫۷۴	۱
۴۶٫۷۸۳	۴۶٫۱۷۹	۲
۴۸٫۰۹۵	۴۷٫۴۹۶	۳
۴۸٫۵۳۲	۴۷٫۹۳۵	۴
۴۸٫۹۷	۴۸٫۳۷۴	۵
۴۸٫۵۳۲	۴۷٫۹۳۵	۶
۴۵٫۹۰۸	۴۵٫۳۰۱	۷
۵۴٫۶۵۵	۵۴٫۰۸۱	۸
۵۰٫۷۱۹	۵۰٫۱۳	۹

بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک از رسیدن به جواب‌های بهینه مطلق مطمئن می‌شویم. نقطه تعادل نَش برای رسیدن به سود حداکثر شرکت‌های بازار مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت روش پیشنهادی به وسیله مطالعات موردی مورد تأیید قرار گرفته است.

زمان حل مسئله به وسیله روش پیشنهادی نسبت به [۶] در شبکه‌های بزرگ بسیار کمتر است. به طور مثال زمان حل شبکه ۱۱۸ شینه به وسیله [۶] در حدود ۳۰ دقیقه و به وسیله روش پیشنهادی در حدود ۴ دقیقه می‌باشد، که بسیار قابل توجه است.

در انتها پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه می‌شود:

- در نظر گرفتن توان راکتیو و تلفات سیستم برای مدل‌کردن شرایط واقعی‌تر.
- گسترش مفهوم تراکم خطوط در رابطه با توان ظاهری.
- مدل‌کردن عدم قطعیت‌های مختلف.

مراجع

[1] W. Mielczarski, G. Michalik, and M. Widjaja, "Bidding strategic in electricity markets," in *Proc. of the 1999 IEEE PES Power Industry Computer Application Conf., PICA'99*, pp. 71-76. Santa Clara, CA, US, Jul. 1999.

[2] Z. Yu, F. T. Sparrow, T. L. Morin, and G. Nderitu, "A stackelberg price leadership model with application to deregulated electricity

Archive of SID

www.SID.ir

markets," in *Proc. of IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1814-1819, Singapore, Jan. 2000.
[3] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour, and V. C. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1340-1347, Aug. 1997.
[4] L. C. Teo, *Gaming in Electricity Market*, Undergraduate Thesis, University of Queensland, Queensland, Australia, 2002.
[5] G. A. Berry, B. F. Hobbs, W. A. Meroney, R. P. O'Neill, and, W. R. Stewart, "Analyzing strategic bidding behavior in transmission networks," *IEEE Tutorial on Game Theory Applications in Electric Power Markets,* Editor: H. Singh, IEEE PES, pp. 7-32, 1999.
[6] J. D. Weber and T. J. Overbye, "A two-level optimization problem for analysis of market bidding strategies," in *Proc. of IEEE Power Engineering Society 1999 Summer Meeting*, vol. 2, pp. 682-687, Jul. 1999.
[7] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, John Wiley & Sons, Inc, Chapter 2, 1990.
[8] C. W. Richter and G. B. Sheble, "Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies for the competitive marketplace," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 13, no. 1, pp. 256-261, Feb. 1998.
[9] C. W. Richter, G. B. Sheble, and D. Ashlock, "Comprehensive bidding strategies with genetic programming/finite state automata," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1207-1212, Nov. 1999.
[10] P. F. Correia, *The Use of Noncooperative Games to Determine Strategic Bidding in Centralized Electricity Markets*, Ph. D. Dissertation, Univ. Illinois at Urbana - Champaign, Dept. Electrical Comput. Eng., Appendix A, pp. 104-107, 2002.

ناصر بائی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نمود. از سال ۱۳۷۹ الی ۱۳۸۱ نام‌برده به ترتیب در کارخانه رینگ سایپای خرمشهر به عنوان مسئول برق و ابزار دقیق و اداره آب و برق و بخار پالایشگاه آبادان به کار مشغول بود. در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۸۳ تاکنون به ترتیب در بخش مطالعات سیستم شرکت مشانیر و اتوماسیون مراکز دیسپاچینگ شرکت ABB به کار مشغول بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، مدیریت انرژی، تجدید ساختار در صنعت برق و اتوماسیون مراکز دیسپاچینگ.

محسن پارسا مقدم تحصیلات خود را در رشته مهندسی برق در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۵۸ در دانشگاه صنعتی شریف و در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۶۵ در دانشگاه صنعتی تویوهاشی ژاپن و در مقطع دکتری در سال ۱۳۶۷ در دانشگاه توهوکو ژاپن به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار بخش مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، مدیریت انرژی، تجدید ساختار در صنعت برق و کاربرد هوش محاسباتی در سیستم‌های قدرت می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir