مدلسازی تابع چند هدفی به منظور بارزدایی بهینه فرکانسی در محیط بازار رقابتی برق

سهیل رنجبر[1]

[1] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، s.ranjbar@velayat.ac.ir

چکیده

بهره‌برداری عادی سیستم قدرت در شرایط بازار برق رقابتی شامل حضور انواع مالکان واحدهای ژنراتوری و بارها با هدف میل به حداکثر سود است. در این شرایط، باتوجه به اضطرار قابلیت اطمینان شبکه، رله‌های فرکانسی همواره در حالت آماده به کار بوده به‌گونه‌ای که در صورت وقوع رخداد پیشامد آغازگری مانند قطع توان خروجی نیروگاه، در عرض چند ثانیه باید به صورت خودکار راه اندازی شود. بنابراین، به منظور اطمینان از کارکرد تجهیزات حفاظتی در هنگام عرضا و تقاضا در محیط بازار رقابتی برق، چگونگی مدل‌سازی شبکه و تامین توان مورد نیاز در این سیستم حائز اهمیت می باشد. در این مقاله، باتوجه به ارزیابی دینامیکی قابلیت اطمینان شبکه در محیط رقابتی بازار برق، مدلی چندهدفه به‌منظور بارزدایی بهینه فرکانسی مبتنی بر حصول حداکثر سود مالکان نیروگاهی معرفی می‌شود. در روش پیشنهادی با به کار بردن دیاگرام بلوک قابلیت اطمینان دینامیکی شبکه و درخت خطای دینامیکی برای نشان دادن اثر فرسودگی بر روی مدل قابلیت اطمینان، مدل بهینه برای دستیابی به حداقل بارزدایی در شبکه معرفی و پیاده‌سازی می‌شود. روش پیشنهادی بر روی شبکه آزمون ۳۹ باسه پیادسازی شده و نتایج نشان دهنده توانایی مدل در کنترل فرکانس شبکه با حداقل حذف بار در شبکه می‌باشد.

واژه های کلیدی

بازار برق، تابع چند هدفه، بارزدایی، کنترل فرکانس.

مقدمه

هدف ا صلی برای سی ستمهای قدرت امروزی فراهم کردن توان مورد نیاز برای م شترکین با کمترین هزینه ممکن و سطح مطلوب قابلیت اطمینان میبا شد. عمده‌ی این شبکه‌ها بوا سطه عدم ر شد متوازن شبکه‌های انتقال با بار م صرفی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها، به شدت در برابر ر شد بار، کمبود تولید وبروز خطاهای متفاوت آ سیب پذیر شده‌اند به قسمی که در خاموشی های سراسری اخیر در برخی ک شورها ناپایداری ولتاژ و فرکانس دلیل ا صلی قطعی بوده ا ست. بارزدایی یکی از آخرین اقدامات کنترلی سیستم به منظور حفظ امنیت سی ستم پس از وقوع یک پی شامد احتمالی در شبکه می‌با شد به‌طوری‌که با انجام بارزدایی بهینه و منا سب می توان از ناپایداری فرکانس و ولتاژ در شبکه جلوگیری کرد. این بارها بارهایی هستند که در کارخانه‌های بزرگ صنعتی در صورت فراهم بودن تولید اضافی وارد مدار میگردند و در صورت نیاز شبکه به جدا شدن آنها، از شبکه جدا میگردند. بارهای قابل پخش پا سخگو به قیمت نیز با توجه به شرایط اقتصادی حاکم بر بازار و پیشنهاداتشان به صورت حساس به قیمت از شبکه جدا میگردند [۱].

در زمینه یافتن مدل واقع بینانه‌ای کنترل بهینه فرکانس در محیط رقابتی بازار برق، کارهای زیادی انجام شده است. یک روش تعیین معادله بار، ارائه مدلی برای آن و ارزیابی پارامترهای این مدل از طریق اندازه‌گیریهای واقعی می‌باشد [۲]. در دیگر روش‌ها با استفاده از بررسی رفتار دینامیکی بار، مدل‌سازی بارزدایی فرکانسی انجام شده است [۳]. در مطالعات دینامیکی کنترل فرکانس، بارها به دو دسته کلی بارهای استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. کنترل فرمانس بارهای استاتیکی با تأیید کمیته سیستم قدرت IEEE با توابع غیرخطی از ولتاژ باس بار نمایش داده شده [۴] و در زمینه بارهای دینامیک، کنترل فرکانس با یک موتور القایی معادل‌سازی می‌شوند [۵]. همچنین، در برخی مطالعات شبکه‌های قدرت، کنترل فرکانس بار با یک امپدانس ثابت مدل می‌شود [۶]. اما این مدل همواره دقیق نیست، بویژه در شبکه‌های بزرگ صنعتی که بیشتر بارهایشان را موتورهای بزرگ تشکیل می‌دهند. درنظرگرفتن مدلهای دقیق برای کنترل فرکانس و بارزدایی در محیط رقابتی بازار برق در مطالعات دینامیکی برای اولین بار در [۷] مطرح گردید. پس از آن در مقالات متعددی تأثیر انواع مدلهای بار بر پایداری سیستم‌های قدرت بررسی شدند [۸ و۹]. در این مراجع اثرات مدلهای بار بر روی شبکه‌هایAC و DC بررسی شده‌اند.

در این مقاله با ا ستف ـاده از مدل خطی سیستم بوده که پس از خطی سازی معادله هر عن صر به تنهایی و اتـ صال این عنا صر تو سط روش بهم پیوستن اجزاء، مدل بهینه بارزدایی فرکانسی به‌دست می‌آید.

با توجه به تعیین مقدار کل بارزدایی جهت قرار گرفتن فرکانس در محدوده مجاز خود، میزان کل بارزدایی سیستم تعیین شده تا بتوان با تعیین محل منا سب بارزدایی، بیشینه سود بازیگران بازاربرق از جمله بی شینه سود متـ صدیان تولید، هزینه جریمه پرداخت در صورت عدم تولید بار مورد نیاز م صرف کنندگان و همچنین کمینه نمودن هزینه گرفتگی خطوط پس از وقوع پیشامد احتمالی در سیستم را انجام داد. در ادامه طرح بارزدایی حالت ماندگار سی ستم قدرت مورد برر سی از یک تابع چند هدفه به منظور بهینه سازی یک مدل اقتصادی بارزدایی

با ایجاد کمترین هزینه ممکن برای شرکت کنندگان در بازار برق در سیستم قدرت مورد بررسی استفاده می شود. بطوریکه نقش بازیگران در بازار برق از جمله هزینه گرفتگی خطوط سود متصدیان تولید جریمه ناشی از توان تامین نشده بارها در هنگام بارزدایی لحاظ می‌شود.

تعیین هزینه گرفتگی خطوط

هنگامیکه یک خروج در یک سیستم قدرت رخ میدهد، بعلت ظرفیت ناکافی سیستم انتقال، هزینه گرفتگی ممکن است افزایش یابد. با اجرای طرح بارزدایی مبتنی بر بازار برق، هر متصدی تولید که ژنراتورهای مربوط به آن از سیستم قدرت جدا گردند؛ ملزم به پرداخت هزینههای مقدار توان تأمین نشده میباشد که بعنوان جریمه‌ای برای بارزدایی در نظر گرفته میشود. از سوی دیگر، بهره‌بردار مستقل سیستم مسئولیت پرداخت هزینههای مقدار توان تأمین نشده در صورت بروز خروج یک خط را برعهده دارد. همچنین تأثیر گرفتگی بر روی قیمت تسویه بازار ممکن است منجر به تفاوت در قیمتهای حاشیهای محلی گردد. هزینهی گرفتگی خطوط به عنوان حاصلضرب اختلاف بین قیمتهای حاشیهای محلی در توان عبوری از خط دارای گرفتگی تعریف میگردد

$$f_1 = -\sum_{i \neq j}^{n_B} (\lambda_i - \lambda_j) P_{ij} \quad , P_{ij} \geq 0 \qquad (۱)$$

در این رابطه f_1 برابر با هزینه گرفتگی خطوط انتقال بر حسب دلار می‌باشد، همچنین λ_i و λ_j بیانگر قیمت حاشیه‌ای محلی شینه‌های i و j بر حسب دلار بر مگاوات ساعت و P_{ij} برابر با مقدار توان عبوری از خط ij بر حسب مگاوات هستند.

سود متصدیان تولید با در نظر گرفتن جریمه

هزینه های مقدار توان تأمین نشده از حاصل ضرب مقدار مگاوات بار جداشده از سیستم و هزینه حاشیهای بارزداییمی باشد که توسط رابطه ذیل بیان می گردد:

$$LSMP_i^k = \alpha_i^k LMP_i^k \qquad (۲)$$

که در این رابطه α ضریبی است که به عنوان ضریب اهمیت بار شناخته میشود. بنابراین سود متصدیان تولید از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n_G} R_{GENCO} - \sum_{i=1}^{n_G} C_{GENCO} - \sum_{i=1}^{n_B} C_{EPNS} \qquad (۳)$$

که در این رابطه $RGENCO$ درآمد متصدی تولید بر حسب دلار بر ساعت، $CGENCO$ هزینه هر متصدی تولید بر حسب دلار بر ساعت و nG هزینه مقدار توان تأمین نشده بر حسب دلار بر ساعت میبا شند. nG و nB به ترتیب برابر با تعداد متصدیان تولید و تعداد شینه‌های سیستم می‌باشند. برای تعیین محل و مقدار بارزدایی در هر یک از بارهای شبکه جهت بهینه سازی از الگوریتم اجتماع ذرات PSO استفاده می‌شود.

تابع هدف مسئله

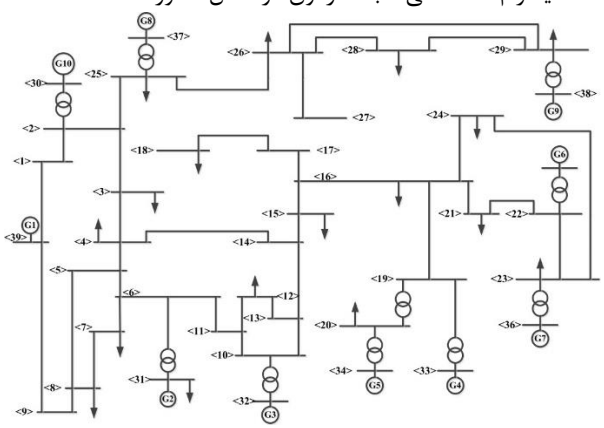
الگوریتم PSO از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که از مدلهای واقعی در طبیعت الهام گرفته شده است. این الگوریتم با شروع از یک گروه از جوابهای تصادفی برای یافتن جواب بهینه در فضای مساله با به روز کردن موقعیت ذرات به جستجو می پردازد. هر ذره به صورت چند بعدی با دو مقدار مشخص که معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوطه می باشد. در هر مرحله از حرکت جمعیت هر ذره با دو مقدار بهترین، به روز می شود. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تا کنون برای هر ذره بطور جداگانه بدست آمده است دومین مقدار، بهترین مقداری است که تا کنون توسط تمام ذره ها در میان جمعیت بدست آمده است. بعد از یافتن مقادیر هرذره، سرعت و مکان جدید بدست می آید. بنابراین با در نظر گرفتن الگوریتم اجتماع ذرات تابع هدف نهایی مساله به صورت زیر می باشد:

$$Maximize \left\{ \sum w_1 \frac{f_1}{f_1^{\max}} + w_2 \frac{f_2}{f_2^{\max}} \right\} \qquad (۴)$$

ضرایب w_1 و w_2 با استفاده از دانش تخصصی و براساس تجربه تعیین می‌گردند. همچنین $f_1^{\max}$ کمینه مقدار ممکن هزینه گرفتگی خطوط هنگام بارزدایی میبا شد و $f_2^{\max}$ بیشترین سود قابل حصول برای هر متصدی تولید با درنظر گرفتن هزینه‌های ناشی از جریمه توان تأمین نشده مرتبط با وقوع یک پیشامد در سیستم قدرت است.

نتایج شبیه‌سازی

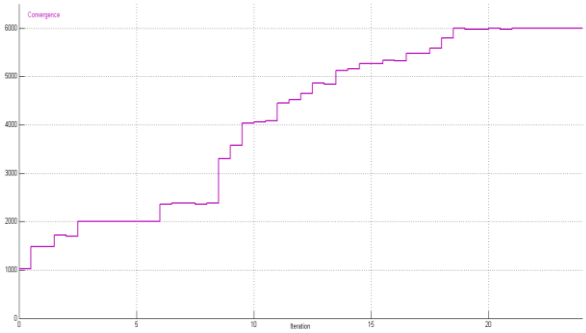
جهت بررسی بارزدایی از شبکه ۳۹ باسه تغییر یافته استفاده شده است. دیاگرام تک خطی شبکه آزمون در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: شبکه آزمون ۳۹ باسه مورد مطالعه.

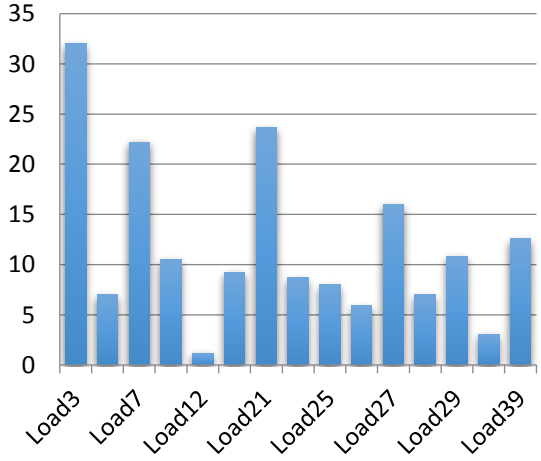
مطابق با شکل ۱، شبکه پیشنهادی دارای ۳۹ شین و ۴۶ خط انتقال می باشد. این شبکه شامل ۱۰ ژنراتور و ۲۱ بار شامل بار قابل پخش و حساس به قیمت می‌باشد. در ابتدا پیش از بارزدایی، بارهای قابل پخش در سیستم موجود میباشند. سپس بعد از بارزدایی با توجه به بیشینه سود بازیگران بازار برق مقدار مورد نیاز بار از بارهای ثابت و بارهای حساس به قیمت جدا می شود. میزان عرضه و پیشنهاد قیمت هریک از متصدیان تولید بازار برق رقابتی می‌باشد.

با توجه به هدف ۴ ساله، بارزدایی بهینه بایستی به نحوی صورت گیرد که علاوه بر قراردادن فرکانس سیستم در حد مجاز، بیشینه سود متصدیان تولید با در نظر گرفتن جریمه ناشی از عدم تولید بارمورد نیاز در بازار برق نیز حاصل شود. بنابراین با توجه به روابط ذکر شده، پس از اجرای تابع هدف مسئله بعد از حدود ۲۵ مرحله تکرار، مقدار بهینه جواب بدست میآید. نمایی از منحنی همگرایی بدست آمده توسط الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: همگرایی تابع هدف بارزدایی بهدست آمده از PSO.

پس از انجام بهینه سازی با در نظر گرفتن بیشینه سود بازیگران بازار برق مقدار هزینه گرفتگی خطوط تعیین شده است. بنابراین میزان کل بارزدایی شامل بارهای ثابت و قابل پخش بر روی هر باس سیستم به منظور ایجاد بیشینه سود بازیگران بازاربرق و حفظ بازه مناسب فرکانسی سیستم طبق نمودار شکل ۳ است.



شکل ۳: بارزدایی شینه‌های مختلف از شبکه آزمون.

مطابق نمودار، نشان داده شده در شکل ۳، بارزدایی در شین ۳ بیشتر از سایر شین های بار است.لذا با یافتن و مدیریت بارهایی از این قبیل می توان سود نهایی برای مشترکین و منابع تولید را افزایش داد به نحوی که با در نظر گرفتن مقدار فرکانس ملندگار، مقدار حذف بار کمینه به منظور قرار دادن فرکانس ماندگار سیستم در محدوده مجاز قرار گیرد. بدین منظور در نظر گرفتن پارامترهای بازار رقابتی برق و در نظر گرفتن بارهای قابل پخش و حساس به قیمت وقیمتهای عرضه آنها در بازار برق و با در نظر گرفتن قیمتهای پیشنهادی متصدیان تولید در بازار برق این کار صورت گرفته تا بتوان علاوه بردا شتن سیستم امن از لحاظ قرار گرفتن فرکانس سیستم در محدوده مجاز، بیشترین سود برای متصدیان تولید و کمترین هزینه گرفتگی خطوط را در سیستم ایجاد کرد. نتایج بدست آمده برروی شبکه ۳۹ باسه نشان دهنده کارا بودن روش پیشنهادی چه از نظر ایجاد سیستم امن و مطمئن و چه از نظر اقتصادی و ایجاد بیشینه سود بازیگران برق در شبکه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه در زمینه بارزدایی فرکانسی مبتنی بر حضور ماکلان واحدهای ژنراتوری در حضور بازار رقابتی برق ارائه شده است. در این زمینه، با بررسی انواع مدل‌های بار، تأثیر آن‌ها را بر پایداری دینامیکی شبکه بررسی شده و تابع هدف مسئله معرفی شده است. ملاحظه شد که مل پیشنهادی در محیط رقابتی دارای پاسخ مناسب و عملکرد مطمئنی در زمینه حضور مالکان نیروگاه‌ها و حدال حذف بار در شبکه بوده است. عملکرد بارزدایی بهینه فرکانسی مبتنی بر تابع مدل بار و حساس به نوع بار پیاده‌سازی شده است. با استفاده از روش مدل‌سازی بهم پیوستن اجزاء، به یک مدل پیشنهادی ساده برای محاسبه حساسیت فرکانسی بار نسبت به هر پارامتر شبکه دست یافته و این مدل به‌خوبی توانسته رفتار سیستم را در اثر تغییرات پارامترها قابل پیش‌بینی بار تخمین بزند. مدل پیشنهادی بر روی شبکه آزمون ۳۹ باسه پیاده‌سازی شده و نتایج نشان دهنده توانایی روش در کنترل بهینه فرکانس با کمینه حذف بار در شبکه بوده است.

مراجع

[1] Farhad Elyasichamazkoti, Saeed Teimourzadeh, Farrokh Aminifar, " Optimal Distribution of Power Grid Under-Frequency Load Shedding With Security Considerations", IEEE Transactions on Power Systems, 37(4), 2022.

[2] Samuel Gordon, Connor McGarry, James Tait, Keith Bell, " Impact of Low Inertia and High Distributed Generation on the Effectiveness of Under Frequency

Load Shedding Schemes", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(5), 2022.

[3] Ying-Yi Hong, Chih-Yang Hsiao, " Under-Frequency Load Shedding in a Standalone Power System With Wind-Turbine Generators Using Fuzzy PSO", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(2), 2022.

[4] Hui Liu, Houlin Pan, Ni Wang, Muhammad Zain Yousaf, Hui Hwang Goh, Saifur Rahman, " Robust Under-Frequency Load Shedding With Electric Vehicles Under Wind Power and Commute Uncertainties", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(5), 2022.

[5] Qiteng Hong, Liang Ji, Steven M. Blair, Dimitrios Tzelepis, Mazaher Karimi, Vladimir Terzija, Campbell D. Booth, " A New Load Shedding Scheme With Consideration of Distributed Energy Resources' Active Power Ramping Capability", *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(1), 2022.

[6] Tadej Skrjanc, Rafael Mihalic, Urban Rudez, " A Non-Intrusive Approach for Enhancing Power-System Frequency Stability", IEEE Transactions on Power Systems, 37(4), 2022.

[7] Hamidreza Javanmardi, Maryam Dehghani, Mohsen Mohammadi, Sara Siamak, Mohammad Reza Hesamzadeh, " BMI-Based Load Frequency Control in Microgrids Under False Data Injection Attacks", *IEEE Systems Journal*, 16(1), 2022.

[8] Gibong Son, Zhengrong Huang, Qiang Li, " Light Load Efficiency Improvement for Two-Channel Paralleled Soft-Switching Three-Phase Inverter Using Phase Shedding Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(9), 2022.

[9] Jian Xie, Wei Sun, " Distributional Deep Reinforcement Learning-Based Emergency Frequency Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(4), 2022.