

تجمیع منابع انرژی پراکنده در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته

معین ابوالقاسمی^{*۱}

محمدصادق قاضی‌زاده^۲

مهرداد ستایش‌نظر^۳

چکیده

مفهوم نیروگاه مجازی را می‌توان برای تجمیع منابع انرژی پراکنده در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته به کار برد. این مقاله یک مدل بهینه‌سازی را که راهبرد بهره‌برداری بهینه، حداکثر سود و کاهش آلودگی برای یک نیروگاه مجازی را فراهم می‌کند، ارائه می‌نماید. نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل یک توربین بادی، یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت، چندین واحد تولید پراکنده و بارهایی با قابلیت قطع می‌باشد. نیروگاه مجازی می‌تواند در بازار عمده‌فروشی برق، با دو نقش تولیدکننده و مصرف‌کننده، مشارکت نماید. مدل ارائه‌شده یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی توأم با اعداد صحیح به همراه قیود می‌باشد. در این مسئله تابع هدف سود نیروگاه مجازی است که تأمین انرژی بارهای حرارتی و الکتریکی هدف آن می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از GAMS کارائی مدل برای تأمین تقاضا و کاهش آلودگی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

نیروگاه مجازی، منابع انرژی پراکنده تولید پراکنده، بازار برق، کاهش آلودگی.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران.
moeinabolghasemi@stud.pwut.ac.ir

۲. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

۳. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

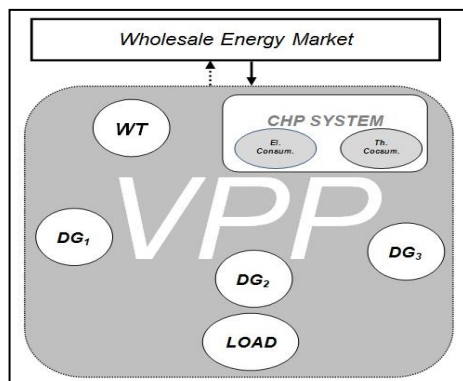
مقدمه

فشار ضعیف) پخش شوند.

در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی که راهبرد بهره‌برداری بهینه، حداکثر سود و کاهش آلودگی برای یک نیروگاه مجازی را فراهم می‌کند، ارائه می‌شود. نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل یک توربین بادی، یک سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت، چندین واحد تولید پراکنده و بارهایی با قابلیت قطع می‌باشد. مدل ارائه شده یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی توأم با اعداد صحیح به همراه قیود می‌باشد که با استفاده از GAMS حل شده و نتایج ارائه شده است.

مدل سیستم

در این مطالعه فرض بر این است که مرکز کنترل هماهنگ‌کننده (CCC^۸) VPP را کنترل می‌کند. [۶] هدف این مرکز بیشینه کردن عایدی‌های VPP بر حسب واحد پول^۹ برای تأمین انرژی مورد نیاز بارهای درون ناحیه کنترلی و مبادله با بازار عمده فروشی برق و کاهش آلودگی می‌باشد. ساختار VPP در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار نیروگاه مجازی

در این ساختار یک توربین بادی، یک سیستم «CHP»، سه واحد «DG» و بارهای قطع پذیر^{۱۰} و غیرقابل قطع^{۱۱} وجود دارند. مالکیت و مدیریت CHP و تولیدات پراکنده از آن «VPP» است. بارهای درون ناحیه کنترلیش VPP با یک نرخ ثابت خرده فروشی تأمین می‌شوند و VPP هزینه انرژی تأمین نشده برای بارهای قابل قطع را در محاسبات خود لحاظ می‌کند. مدل هر یک از اجزا VPP در ادامه شرح داده می‌شود.

طی چند دهه اخیر، با تجدید ساختار در صنعت برق، سیستم‌های تولید انرژی در شبکه‌های قدرت، از تولید متمرکز در نیروگاه‌های بزرگ به سمت تولید در مقیاس کوچک در شبکه‌های توزیع گرایش نشان داده‌اند. این مسئله باعث رشد روزافزون استفاده از منابع انرژی پراکنده (DER^۱) - شامل تولیدات پراکنده (DG^۲)، پاسخ تقاضا^۳ و ذخیره‌سازهای انرژی^۴ - در سطح شبکه قدرت شده است؛ اما از آنجاکه ظرفیت نامی این منابع پائین است، قادر به شرکت در بازار برق نبوده و نمی‌توانند از فرصت‌های اقتصادی حاصل در این محیط استفاده کنند. برای حل این چالش و استفاده از این منابع برای ارائه خدمات جانبی^۵ به شبکه قدرت انتقال، مفاهیم جدیدی برای تجمیع این منابع در شبکه توزیع برق ایجاد شده است. نیروگاه مجازی^۶ یکی از مفاهیم کلیدی است که برای بهره‌برداری و مدیریت منابع انرژی پراکنده و تجمیع و درنهایت مشارکت آنها در بازارهای برق به کار می‌رود. (۱) مدل‌ها و تعاریف متفاوتی برای VPP در مراجع مختلف ارائه شده است. در مرجع (۲) مفهوم VPP برای تسهیل مبادلات تولیدات پراکنده در بازار عمده فروشی برق به کار گرفته شده است و استراتژی قیمت‌دهی یک VPP در بازار به دست آمده است. در [3] VPP یک تجمیع‌کننده می‌باشد که تنها منابع پراکنده با تکنولوژی‌های متفاوتی را - که در سطح شبکه توزیع فشار متوسط پخش شده‌اند - را در نظر می‌گیرد. نیروگاه مجازی در (۲) یک تجمیع از تعداد زیادی تولیدکننده هم‌زمان برق و حرارت در مقیاس کوچک^۷ می‌باشد که به شبکه توزیع فشار متوسط متصل شده‌اند. مفهومی که برای نیروگاه مجازی در (۵) ارائه شده، به این صورت است که VPP ترکیبی از DERهایی با تکنولوژی‌های متفاوت و الگوهای بهره‌برداری گوناگون و همچنین در دسترس پذیری مختلف است که می‌توانند در سطح شبکه توزیع (فشار متوسط و

1. Distributed Energy Resources (DER).
2. Distributed Generation (DG).
3. Demand Response.
4. Energy Storage.
5. Ancillary Services.
6. Virtual Power Plant (VPP).
7. micro- Combined Heat and Power Production (CHP).

8. Control Coordination Center (CCC).
9. Monetary Unit.
10. Interruptible Loads.
11. Non-interruptible Loads.

مدل اجزا VPP

تولید شده برای این DG ها با استفاده از رابطه (۲) مدل می‌شود.

$$C_{DG_i}(t) = \alpha_{DG_i} P_{DG_{i,t}}^2 + \beta_{DG_i} P_{DG_{i,t}} \quad (2)$$

بارها: مصرف کننده‌هایی که VPP موظف است انرژی مورد نیاز آنها را تأمین کند. هزینه انرژی تأمین نشده (C_{us}) برای بارهای قطع پذیر به عنوان تابعی از میزان انرژی تأمین نشده (P_{us}) مدل می‌شود:

$$C_{us}(t) = \alpha_{us} P_{us,t}^2 + \beta_{us} P_{us,t} \quad (3)$$

مدل آلودگی

آلاینده‌های جوی از قبیل SO_2 , CO_2 و NO_x که از سوختن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شوند. مدل این آلاینده‌ها را می‌توان به صورت معادله (۴) در نظر گرفت.

$$(11)$$

$$(4)$$

$E(P_{i,t}) = 10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{i,t})$
در این رابطه $P_{i,t}$ توان خروجی ژنراتور نام و α , β و γ ضرایبی هستند که مشخصه آلودگی هر ژنراتور را توصیف می‌کند. پارامترهای واحدهای تولیدی با استفاده از مدل آلودگی توصیف شده در (۱۲) و داده‌های (۱۳) محاسبه شده‌اند.

مسئله بهینه‌سازی

تابع هدف

در مسئله بهینه‌سازی، تابع هدف سود VPP، حاصل از مبادلات انرژی آن با بازار برق و تأمین بارهای درون ناحیه کنترل می‌باشد. تابع هدف این مسئله در رابطه (۵) آمده است:

$$(5)$$

$$\begin{aligned} \text{Max Benefit} = & \sum_{t=1:24} \rho_{L,t} \cdot \text{Load}_t - \sum_{t=1:24} \rho_{ex,t} \cdot P_{ex,t} \\ & - \sum_{t=1:24} [f_{CHP_{sys,t}} \cdot \rho_{ng,t} + e_{sys,t} \cdot \rho_{L,t} + E(e_{CHP_{sys,t}})] \\ & - \sum_{\substack{i=1:3 \\ t=1:24}} [C_{DG_{i,t}} + E(P_{DG_{i,t}})] \cdot x_{i,t} - \sum_{t=1:24} C_{us,t} \end{aligned}$$

$$\text{Load}_t = \text{LOAD}_t - P_{WT,t}$$

$$h_s(0) = h_s(24)$$

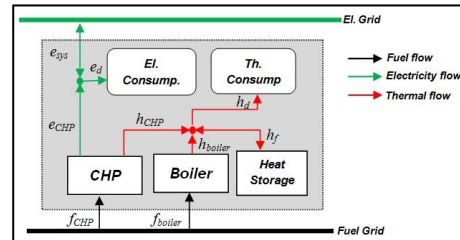
در رابطه بالا $\rho_{L,t}$ و $\rho_{ex,t}$ به ترتیب نرخ خرده‌فروشی

توربین بادی: ^۱ توان خروجی این واحد به سرعت باد و پارامترهای منحنی عملکرد توانی وابسته است. سرعت باد (WS) را می‌توان به وسیله تابع توزیع احتمال رایلی تخمین زد (۷) و توان خروجی توربین را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه کرد: (۸)

$$P_{WT}(WS) = \begin{cases} 0 & 0 \leq WS < v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(WS - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq WS < v_r \\ P_{rated} & v_r \leq WS < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq WS \end{cases}$$

در این مطالعه عدم قطعیت سرعت باد در نظر گرفته نشده است و با فرض پیش بینی سرعت باد توان خروجی توربین به صورت بار منفی در نظر گرفته شده است. توان نامی توربین بادی $P_{rated} = 75 \text{ kW}$ ، حد پائین سرعت باد $v_{ci} = 3 \text{ m/s}$ و حد بالای آن $v_{co} = 25 \text{ m/s}$ می‌باشد. از هزینه تولید این واحد صرفه نظر شده است.

سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP): ساختار مورد استفاده برای شبیه‌سازی این سیستم در شکل (۲) آمده است. (۹)



شکل (۲): ساختار سیستم CHP [9]

این سیستم از یک واحد CHP، یک ذخیره‌ساز حرارتی و یک بویلر تشکیل شده است. واحد CHP بر مبنای تکنولوژی موتورهای احتراق داخلی است. این سیستم باید تقاضای انرژی حرارتی و الکتریکی خود را تأمین کند. واحدهای تولید پراکنده: در اینجا، تکنولوژی‌های در نظر گرفته شده برای تولیدات پراکنده شامل پیل سوختی، میکروتوربین و دیزل ژنراتور می‌باشد. (۱۰) هزینه انرژی

1. Wind Turbine (WT).

$$h_{s,t} \leq h_{s_max} \quad (16)$$

۳. قیود مربوط به تولیدات پراکنده:

- محدودیت توان خروجی DG:

$$P_{\min,i} \leq x_i^t \cdot P_{DG_{i,t}} \leq P_{\max,i} \quad (17)$$

- حداقل زمان روشن و حداقل زمان خاموش بودن:

$$\left[U_{i,t-1}^{up} - MUT_i \right] \times \left[x_i^{t-1} - x_i^t \right] \geq 0 \quad (18)$$

$$\left[U_{i,t-1}^{down} - MDT_i \right] \times \left[x_i^t - x_i^{t-1} \right] \geq 0 \quad (19)$$

۴. قید بارهای قطع پذیر:

$$P_{us,t} \leq 0.1 \times Load_t \quad (20)$$

۴. حل مسئله بهینه‌سازی

مسئله بهینه‌سازی در بخش قبل به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح^۱ مدل‌سازی شده و در محیط نرم افزار GAMS پیاده‌سازی گردیده است. در شکل (۳) میزان بار کل سیستم در هر ساعت و همچنین میزان بار باقی‌مانده پس از کسر توان تولیدی توربین بادی نشان داده است.

و قیمت بازار عمده‌فروشی برق در هر ساعت، $LOAD_t$ کل بار سیستم و $Load_t$ میزان بار سیستم پس از کسر توان تولیدی توربین بادی، $h_s(0)$ و $h_s(24)$ به ترتیب میزان انرژی حرارتی ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی در ابتدا و انتهای بازه زمانی می‌باشند.

قیود مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر است:

۱. قید تعادل توان تولیدی و تقاضای توان: (۶)

$$P_{ex,t} + \sum_{i=1:3} x_i^t \cdot P_{DG_{i,t}} = Load_t - P_{us,t}$$

۲. قیود سیستم CHP:

- قید تعادل تولید:

$$h_{boiler,t} = f_{boiler,t} \eta_{boiler,t} \quad (7)$$

$$h_{CHP,t} = \frac{\alpha}{1+\alpha} \times f_{CHP,t} \quad (8)$$

$$e_{CHP,t} = \frac{1}{1+\alpha} \times f_{CHP,t} \quad (9)$$

- قیود تعادل سوخت و تعادل الکتریکی و حرارتی:

$$f_{CHP_{sys},t} = f_{boiler,t} + f_{CHP,t} \quad (10)$$

$$e_{sys,t} = e_{demand,t} - e_{CHP,t} \quad (11)$$

$$h_{d,t} = h_{boiler,t} + h_{CHP,t} + h_{f,t} \quad (12)$$

- تعادل ذخیره‌ساز گرمایی:

$$h_{s,t} - h_{f,t} = h_{s,t+1} \quad (13)$$

- قیود مربوط به محدودیت ظرفیت بویلر، ظرفیت

CHP و ذخیره‌ساز گرمایی:

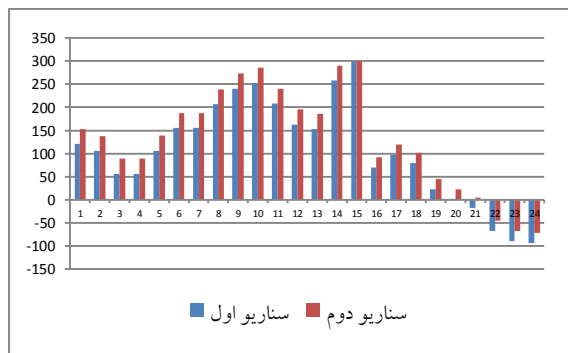
$$f_{boiler,t} \leq f_{\max_boiler} \quad (14)$$

$$f_{CHP,t} \leq f_{\max_CHP} \quad (15)$$

در حالی که در سناریوی دوم، هزینه آلودگی به همراه سایر هزینه‌ها لحاظ شده و سود VPP برای این دو سناریو در هر ساعت در شکل (۵) نشان داده شده است. در شکل (۶) میزان انرژی الکتریکی مبادله شده برای هر سناریو و در هر ساعت نشان داده شده است. سود کلی VPP در سناریوی اول (Monetary Unit) 14786.27 و در سناریوی دوم (Monetary Unit) 8042.83 می‌باشد.

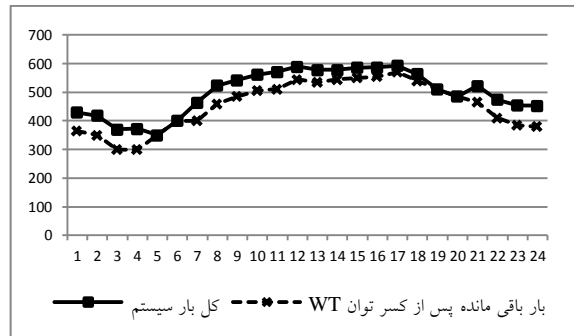


شکل (۵): سود VPP برای سناریوها در هر ساعت



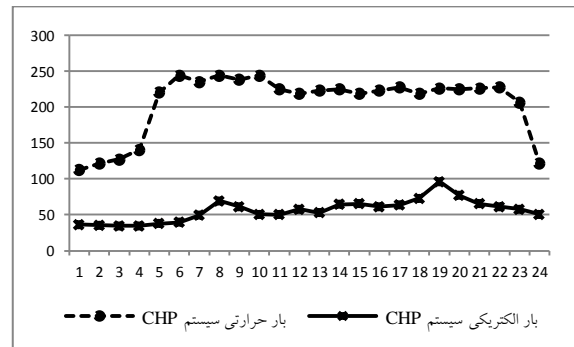
شکل (۶): میزان انرژی مبادله شده با بازار برق برای دو سناریو

بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد؛ میزان سود به دست آمده برای VPP در حالتی که هزینه آلودگی در محاسبات وارد نشود به مراتب بالاتر از زمانی است که این هزینه‌ها در تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. همچنان که در شکل (۶) نشان داده شده، میزان خرید انرژی از بازار عمده‌فروشی برق در سناریوی دوم در ساعت‌های مختلف از مقادیر نظیر آن در سناریوی اول بیشتر است؛ دلیل این



شکل (۳): میزان بار سیستم و بار باقی مانده پس از کسر توان تولیدی توربین بادی

میزان بار الکتریکی و حرارتی سیستم CHP و مشخصات اجزا این سیستم به ترتیب در شکل (۴) و جدول (۱) آمده است.



شکل (۴): بار حرارتی و الکتریکی سیستم CHP

جدول (۱): مشخصات اجزا سیستم CHP

$f_{\max_CHP} = 187.5kW$ $f_{\max_boiler} = 192.3kW$	بیشینه سوخت ورودی برای CHP و بویلر
$\eta_{CHP} = 0.8$ $\eta_{boiler} = 0.85$	بازده کلی انرژی بویلر و CHP
$h_{s_max} = 107.7kW$ $h_s(0) = 57.7kW$	حداکثر ظرفیت ذخیره ساز حرارتی و سطح اولیه حرارتی آن
$\alpha = 2$	نسبت گرما به توان واحد CHP

مسئله بهینه‌سازی در دو سناریو حل شده است. در اولین سناریو، هزینه آلودگی لحاظ نگردیده است؛

- (2007)10-16.
5. D. Pudjianto, C. Ramsay, G. Strbac, and M. Durstewitz, "The virtual power plant: Enabling integration of distributed generation and demand," FENIX Bulletin 2, Feb. (2008).
 6. E. A. Setiawan, "Concept and controllability of virtual power plant," Ph.D. dissertation, Kassel Univ., Kassel, Germany, (2007).
 7. E. Mashhour, S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets-Part I: Problem Formulation," IEEE Trans. Power Sys., vol. PP, (2010)1-8.
 8. F. A. Mohamed and H. N. Koivo. System modelling and online optimal management of microgrid. In Proc. of Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, pages 470 – 478, TU Delft, Delft, The Netherlands, (2006).
 9. Hetzer, J., Yu, C., Bhattarai, K., "An economic dispatch model incorporating wind power," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 23, No. 2, (2008) 603-611.
 10. Morgantown, W., "Emission rates for new DG technologies," the Regulatory Assistance Project, [Online]. Available, <http://www.raponline.org/ProjDocs/DREmsRul/Collfile/DGEmissionsMay2001.pdf>.
 11. Talaq, J. H. El-Hawary, F., and El-Hawary, M. E. "A summary of environmental/economic dispatch algorithms," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, (1994)1508-1516.
 12. Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," IEEE Trans. Power Sys., Vol. 24, No. 2, (2009) 959-966.
 13. You, S. "Developing virtual power plant for optimized distributed energy resources operation and integration," Ph.D. dissertation, Technical Univ, Denmark, (2010).

رخداد وجود هزینه آلودگی برای منابع موجود درون ناحیه کنترلی VPP است که با افزایش تولید این منابع هزینه آلودگی افزایش می‌یابد. از این رو تمایل VPP به خرید انرژی مورد نیاز برای تأمین بار از بازار برق افزایش می‌یابد. علاوه بر آن میزان انرژی فروخته شده به بازار در ساعت‌های ۲۱ تا ۲۴ در سناریوی اول بیشتر از سناریوی دوم می‌باشد، که این پدیده نیز با منطق سازگار است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی مدلی برای تجمیع منابع پراکنده انرژی در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته ارائه گردید. در اینجا نیروگاه مجازی یک سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت، یک توربین بادی، سه واحد تولید پراکنده با تکنولوژی‌های متفاوت و انواع بارها شامل قطع‌پذیر و قطع‌ناپذیر را در یک ناحیه کنترلی تجمیع می‌کند. مدل بهینه‌سازی برای بهره‌برداری از نیروگاه مجازی ارائه شد و مسئله بهینه‌سازی که به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح مدل‌سازی شده، برای دو سناریوی متفاوت و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد و در نهایت با مقایسه و تحلیل نتایج، کارایی مدل ارائه شده نشان داده شد.

مراجع

1. Abido M. A "Enverionmental/Economic Power Dispatch Using Multiobjective Evolutionary Algorithms," IEEE Trans. Power Sys., vol. 18, No. 4(2003) 1529 – 1537.
2. Bignucolo, F., Caldon, R., Prandoni, V., Spelta, S., Vezzola, M., "The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP)," Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle Gateshead, UK, 6 8 Sept. (2006)187-192.
3. C. Schulz, G. Roder, M. Kurrat, "Virtual power plants with combined heat and power micro units," IEEE-International Conference on Future Power Systems, Amsterdam (Netherlands), 16-18 Nov. (2005)1-5.
4. D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," IET Proc., Gen., Transm., Distrib., vol. 1, no. 1,