مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

حسین جوکار[۱]، بهمن بهمنی فیروزی*[۲]، محسن سیماب[۳]

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، jokar.hossien@yahoo.com
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، bahman_bah@miau.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، msimab@miau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۳

چکیده: مسئله مشارکت واحدها (UC) یکی از مسائل مهم در بازار برق به شمار می‌آید که با هوشمند شدن و تجدیدساختار شبکه‌ها اهداف و متغیرهای آن دستخوش تغییراتی شده است. در این مقاله حل و مدل‌سازی مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن شبکه-های هوشمند پیشنهاد شده است. همانطور که می‌دانیم در شبکه‌های هوشمند مسائل جدید همچون مدیریت سمت تقاضا و منابع ذخیره‌ساز انرژی (باتری) و همچنین اهداف جدید همچون کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی واحدها وجود دارد که می‌بایست مدنظر قرار گیرد. در این مقاله مسئله مشارکت واحدها با مدل‌سازی مدیریت سمت تقاضا در کنار شارژ و دشارژ بهینه سیستم ذخیره‌ساز باتری با هدف کمینه کردن هزینه‌های اقتصادی واحدها و باتری و آلایندگی زیست محیطی ارائه شده است. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری قدرتمند همانند Gurobi حل شده و جواب‌های بهینه سراسری تضمین می‌شود. مدل پیشنهادی روی دو شبکه استاندارد ۶ و ۱۱۸ شینه IEEE اجرا شده که نتایج نشان از کارآمدی مدل پیشنهادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مشارکت واحدها، مدیریت سمت تقاضا، منابع ذخیره‌ساز انرژی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح.

۱- مقدمه

مشارکت واحدها (UC) یکی از مهمترین مسائل بهینه‌سازی در بازار برق امروزی بشمار می‌رود، زیرا با توجه به هوشمند شدن شبکه‌های قدرت، نیاز به یک مدیریت بهینه بیش از گذشته احساس می شود. در مدل‌های گذشته مسئله مشارکت واحدها تنها مسائل اقتصادی مانند هزینه ژنراتورها دیده شده بود و مسئله بر این اساس تنها حل می‌گشت. در مرجع [۱] نویسندگان مسئله مشارکت واحدها را با استفاده از روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه با هدف کاهش هزینه متغیر واحدها و هزینه راه‌اندازی حل نمودند. در این میان با هوشمند شدن شبکه‌های قدرت مسائلی همچون آلایندگی‌های زیست محیطی به مسائل مشارکت واحدها اضافه شد و به یکی از اهداف مهم برای حل این مسائل بدل گشت. در مرجع [۲] نویسندگان کاهش هزینه انتشار گاز دی اکسید کربن (CO_2) واحدها را در کنار اهداف اقتصادی در نظر گرفتند. با ادامه گسترش هوشمند سازی شبکه‌های برق مسئله مدیریت سمت تقاضا نیز به مسئله مشارکت واحدها افزوده شد. در مرجع [۳] مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن بارهای تغییر پذیر نیز مدل‌سازی شد، اهداف در این مرجع کاهش هزینه متغیر، هزینه راه‌اندازی و بی‌باری واحدها در نظر گرفته شده بود. با پیشرفت علم در زمینه باتری‌های بزرگ و ذخیره‌سازی انرژی برق،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

مدل‌سازی این منابع در مسائل گوناگون افزایش یافت. در مرجع [۴] از سیستم‌های ذخیره ساز انرژی در مسئله مشارکت واحدها به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی استفاده کرده‌اند. در این مقاله ما ترکیب مسئله مدیریت سمت تقاضا با مسئله بهره‌برداری شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی را در مسئله مشارکت واحدها با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) ارائه داده‌ایم. در مرجع [۵] مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. در این مرجع نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی را با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی واحدها و بهبود شاخص قابلیت اطمینان سیستم ارائه داده‌اند. در مرجع [۶] یک مدل چند سطحی برای حل مسئله مشارکت واحدها در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای را ارائه نموده‌اند. در این مقاله نویسندگان انواع مختلف واحدهای ژنراتوری را مثل منابع تولید پراکنده و منابع ترکیب قدرت و حرارت (CHP) را در ریزشبکه‌ها و در شبکه‌های انتقال منابع حرارتی و گازی را در یک مدل مشارکت واحد چند سطحی و چند ناحیه‌ای با هدف کاشه هزینه‌های بهره‌برداری توسط یک الگوریتم تکاملی پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۷] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مقاوم برای مسئله مشارکت واحدهای حرارتی-آبی ارائه شده است. در این مطالعه یک برنامه‌ریزی کوتاه مدت با در نظر گرفتن حالت‌های احتمالی تقاضا در شبکه مد با تولید سناریوهای مختلف مد نظر قرار گرفته است. در مرجع [۸] نویسندگان یک تابع چند هدفه را در مسئله مشارکت واحدهای ترکیب قدرت و حرارت به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلایندگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) پیشنهاد کردند. در مرجع [۹] یک روش ابتکاری برای حل مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد شده است. در این مرجع نیز منابع تجدیدپذیر به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۰] یک برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله مشارکت واحدها با مدل سازی شبکه گاز ارائه شده است. در این مقاله وجود بارهای گازی و چاه‌های گاز در شبکه گاز در تصمیم‌گیری واحدهای گازی در بازار برق موثر نشان داده شده است. مرجع [۱۱] نویسندگان افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت را در یک مدل سه سطحی برای مسئله مشارکت واحدها در دو شکبه استاندارد ۲۴ و ۱۱۸ شینه ارائه دادند. در مرجع [۱۲] نیز نویسندگان یک بررسی اجمالی به مسئله مشارکت واحدها در مقالات متعدد کرده‌اند. در این مرجع مسئله مشارکت واحدها از لحاظ مدل، روش حل مسئله، الکوریتم‌های حل، فرضیات، قیود و تابع هدف مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این مقاله ما مسئله مشارکت واحدها را با در نظر گرفتن شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره ساز انرژی به همراه مدیریت سمت تقاضا با هدف کاهش هزینه متغیر، بی باری، راه‌اندازی و خاموشی واحدها، کاهش هزینه شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی، کاهش هزینه قطع بار شبکه و همچنین کاهش آلایندگی واحدها با استفاده از یک مدل خطی عدد صحیح مرکب (MILP) برای یک دوره ۲۴ ساعته یا روزپیشرو ارائه دادیم. در بخش بعدی مقاله مدل‌سازی پیشنهادی شامل تعریف مسئله، تابع هدف و قیود ارائه خواهد شد. در بخش سوم نیز دو شبکه آزمایشی معرفی و سناریوها معرفی و نتایج شبیه سازی تجزیه و تحلیل خواهد شد. در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

همانطور که می‌دانیم با قدرتمند شدن نرم‌افزارهای حل مسائل بهینه‌سازی ریاضی در سال‌های اخیر، بسیاری از مقالات بجای حل مدل پیشنهادی بوسیله روش‌های تکاملی و اکتشافی روی به استفاده از این نرم افزارها نموده‌اند. لازمه حل مسائل توسط این نرم افزارها داشتن مسئله بهینه‌سازی در قالب مدل‌های خطی، محدب، خطی باینری می‌باشد. بر خلاف روش‌های تکاملی و اکتشافی که بر پایه جستجو و تصادف می‌باشند و تضمینی برای رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری ندارند، روش‌های مبتنی بر ریاضی که مسائل خطی و خطی باینری را حل می‌کنند کاملا تضمین شده بوده و به جواب‌های بهینه سراسری خواهند رسید، لذا در این مقاله یک مدل ریاضی خطی نیز ارائه شده است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) برای مسئله مشارکت واحدها به همراه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و مدیریت سمت تقاضا ارائه شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در این مقاله به ترتیب اهدف در نظر گرفته شده برابر کمینه سازی هزینه بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، کاهش هزینه بهره‌برداری واحدها، کاهش هزینه بی باری واحدها، کاهش هزینه روشن و خاموشی واحدها، کاهش هزینه آلایندگی واحدها و کاهش هزینه قطع بار شبکه می‌باشد، که برای یک دوره ۲۴ ساعته ویا روز پیشرو فرموله شده است.

$$\min \sum_{n\in N,h\in H} c_n^s \left(\frac{p_{n,h}^{dis}}{\eta_n} + p_{n,h}^{ch}\eta_n\right) + \sum_{n\in N,h\in H} c_n^v p_{n,h} + c_n^e p_{n,h} + c_n^{nl} v_{n,h} + c_n^{su} u_{n,h} + c_n^{sd} s_{n,h} + \sum_{i\in\Delta} c_i^c r_{i,h} \quad (۱)$$

در رابطه (۱) مجموعه واحدهای ژنراتوری با N و مجموعه دوره زمانی با H و مجموعه بارهای شبکه با Δ نشان‌داده شده است. پارامتر c_n^s نشان‌دهنده هزینه بهره‌برداری باتری n ام در یک ساعت می‌باشد. متغیرهای $p_{n,h}^{ch}$ و $p_{n,h}^{dis}$ به ترتیب نشان‌دهنده توان شارژ و دشارژ باتری n ام در ساعت h ام می‌با شد. پارامتر η_n نشان‌دهنده راندمان باتری n ام می‌با شد. پارامتر c_n^v و c_n^e به ترتیب هزینه بهره‌برداری و آلایندگی از واحدهای n ام می‌باشد. متغیر $p_{n,h}$ نشان‌دهنده توان حقیقی واحد n ام در ساعت h ام می‌باشد. پارامترهای c_n^{nl} و c_n^{su} و c_n^{sd} به ترتیب برابر

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

هزینه بی باری، هزینه راه‌اندازی و خاموش‌سازی واحد n ام می‌باشد، به همین ترتیب متغیرهای باینری $v_{n,h}$ و $u_{n,h}$ و $s_{n,h}$ برابر نشـــان‌دهنده وضـــعیت در مدار بودن، روشـــن‌ســـازی و خاموش‌ســـازی واحد n ام در ساعت h ام می‌با شد و در نهایت پارامتر c_i^c برابر هزینه قطع بار در گره i ام و $r_{i,h}$ برابر مقدار قطع بار در گره i ام و در ساعت h ام می‌باشد با معرفی تابع هدف مســئله حال نیز قیود مرتبط با مســئله ارائه خواهد شد. رابطه (۲) ن شان‌دهنده رعایت تعادل توان در شین‌های شبکه را نشان می‌دهد.

$$\sum_{n\in N(i),h\in H} p_{n,h} + \sum_{j\in\Delta(i),h\in H} p_{ij.h} - \sum_{j\in\Delta(i),h\in H} p_{ji,h} = D_{i,h} - r_{i,h} + p_{n,h}^{ch} - p_{n,h}^{dis} \quad (۲)$$

در قید برابر (۲)، $p_{n,h}$ برابر توان حقیقی تولید شـــده از واحد n ام در ســاعت h ام که در گره i ام قرار دارد می‌باشـد. متغیر $p_{ij.h}$ و $p_{ji,h}$ به ترتیب برابر شـار توان حقیقی گره i ام به گره j ام و بلعکس می‌باشـد. متغیر $D_{i,h}$ برابر بار تغیر یافته شـــبکه در گره i ام در ســـاعت h ام می‌باشـــد. متغیر $r_{i,h}$ برابر مقدار قطع بار در گره i ام در ســـاعت h ام می‌باشد.

رابطه (۳) نشـان‌دهنده برابر مجموع بارهای شـبکه با بارهای تغیریافته در برنامه مدیریت سمت تقا ضا می‌با شد. این رابطه تضمین می‌کند که در برنامه مدیریت سمت تقاضا فقط بارها در ساعت مختلف برابر مقدار مجاز جابه جا شـــده و هیچ قطع باری در این برنامه رخ ندهد. در این رابطه $d_{i,h}$ برابر بار شبکه بدون برنامه مدیریت سمت تقاضا می‌باشد.

$$\sum_{i\in\Delta,h\in H} D_{i,h} = \sum_{i\in\Delta,h\in H} d_{i,h} \quad (۳)$$

رابطه نابرابری (۴) تضـــمین می‌کند که بارهای تغیریافته در گره i ام و در ساعت h ام در بازه مجاز تعریف شده باشد.

$$D_{i,h} \le d_{i,h} + d_{i,h}\mu \quad (۴)$$
$$D_{i,h} \ge d_{i,h} - d_{i,h}\mu \quad \forall i \in \Delta, i \in H$$

رابطه (۵) نشان‌دهنده ظرفیت مجاز قابل عبور از خطوط شبکه را نشان می‌دهد.

$$\left|p_{ij,h} = B_{ij}(\theta_i - \theta_j)\right| \le p_{ij}^{max} \quad \forall ij \in \Delta, h \in H \quad (۵)$$

در رابطه (۵) $p_{ij,h}$ برابر شار توان حقیقی خط ij می‌با شد. پارامتر B_{ij} برابر ســوســپتانس خط ij می‌باشـد. متغیر θ_i برابر زاویه ولتاژ گره i ام می‌باشـــد و در نهایت پارامتر p_{ij}^{max} حداکثر ظرفیت توان قابل عبور از خط ij می‌باشد.

رابطه (۶) نشـان‌دهنده حد مجاز بهره‌برداری از واحد n ام در سـاعت h ام نشـــان می‌دهد، که باید بین حداقل توان (p_n^{min}) و حداکثر توان (p_n^{max}) مجاز هر واحد باشد.

$$v_{n,h}p_n^{min} \le p_{n,h} \le v_{n,h}p_n^{max} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (۶)$$

رابطه (۷) نشـــان‌دهنده قید برابری وضـــعیت در مدار بودن واحدها با وضـعیت روشـن‌ســازی و خاموش‌ســازی را نشـان می‌دهد. در واقع این نمایانگر رابطه میان متغیرهای باینری واحدها می‌باشد.

$$v_{n,h} - v_{n,h-1} = u_{n,h} - s_{n,h} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (۷)$$

رابطه (۸) نشان‌دهنده حد مجاز توان شارژ و د شارژ باتری می‌باشد، که می‌بایست توان شارژ و دشارژ باتری از ظرفیت باتری کوچکتر باشد.

$$0 \le \eta_n p_{n,h}^{ch} \le z_{n,h}X_n \quad (۸)$$
$$0 \le \frac{p_{n,h}^{dis}}{\eta_n} \le (1 - z_{n,h})X_n \quad \forall n \in N, h \in H$$

در رابطه بالا پارامتر X_n برابر ظرفیت باتری n ام می‌باشـــد و متغیر باینری $z_{n,h}$ برابر ن شانگر حالت شارژ و د شارژ باتری n ام در ساعت h ام می‌باشـد. اگر این متغیر باینری برابر ۰ باشـد یعنی یا باتری دشـارژ شده و یا بدون تغیر است، اگر این متغیر برابر ۱ شود یعنی باتری شارژ شده است.

رابطه (۹) ن شان‌دهنده قید برابر انرژی مانده در باتری در هر ساعت را نشان می‌دهد.

$$e_{n,h} = e_{n,h-1} + \eta_n p_n^{ch} - \frac{p_{n,h}^{dis}}{\eta_n} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (۹)$$

رابطه (۹) تضـــمین می‌کند که انرژی مانده ($e_{n,h}$) در باتری n ام در ســـاعت h ام برابر انرژی مانده از ســـاعت قبل به علاوه مقدار شـــارژ در ساعت h ام منهای مقدار دشارژ در ساعت h ام می‌باشد.

رابطه (۱۰) نیز ن شان می‌دهد که انرژی مانده در باتری n ام در ساعت h ام باید کوچکتر از ظرفیت باتریn ام نیز باشد.

$$0 \le e_{n,h} \le X_n \quad \forall n \in N, h \in H \quad (۱۰)$$

رابطه (۱۱) نشـان‌دهنده مقدار مجاز قطع بار در گره i ام در ســاعت h ام می‌باشد، که می‌بایست کوچکتر از بار در گره n ام باشد.

$$0 \le r_{i,h} \le d_{i,h} \quad \forall i \in \Delta, h \in H \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۲) حد مجاز زاویه ولتاژ در گره i ام را نشان می‌دهد.

$$-\pi \le \theta_{i,h} \le \pi \quad \forall i \in \Delta, h \in H \quad (۱۲)$$

در نهایت رابطه (۱۳) قید زاویه ولتاژ گره مرجع شبکه را نشان می‌دهد که می‌بایست برابر ۰ در نظر گرفته شود.

$$\theta_{i,h} = 0 \qquad i = ref, h \in H \quad (۱۳)$$

همانطور که مشـاهده شـده مدل مسـئله پیشـنهادی یک مدل خطی باینری (MILP) می‌با شد، که به راحتی با ا ستفاده از نرم‌افزار ریا ضی Gurobi قابل حل می‌باشد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

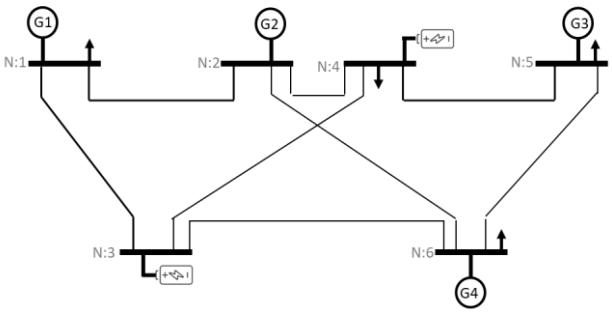
در این بخش نتایج شـبیه‌سـازی و سـیسـتم‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شـده و سـناریوها ارائه می‌شـود. به منظور تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی دو شبکه تست استاندارد ۶ و ۱۱۸ شینه پیاده‌سازی شده اســت. پیاده‌ســازی در محیط MATLAB با اســتفاده از حل‌کننده Gurobi روی سیستم با پردازنده ۷ هسته‌ای با حافظه رم ۸ گیگابایت انجام شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

۱-۳- شبکه ۶ شینه گارور

شبکه ۶ شینه در نظر گرفته شده از مرجع [۱۳] استخراج شده است. شماتیک این شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این شبکه شامل ۴ واحد ژنراتوری روی شین‌های {۱، ۲، ۵ و ۶} می‌باشد، همچنین بارها بر روی شین‌های {۱، ۴، ۵ و ۶} قرار دارد. در این شبکه دو واحد سیستم ذخیره‌ساز باتری قرار دارد که بر روی شین‌های {۳ و ۴} قرار دارد. پارامترهای مربوط به واحدها و سیستم ذخیره ساز در [۱۳] آمده است. حداکثر ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌ساز برابر ۲۰۰ مگاوات و هزینه بهره‌برداری برابر ۰,۵ دلار به ازا هر مگاوات در نظر گرفته شده است. سه سناریو ضریب بار متفاوت ۱، ۱,۲ و ۱,۴ برای تجزیه و تحلیل داده در نظر گرفته شده است.

در ضریب بار ۱ و ۱,۲ مقدار مجاز بار تغییرپذیر در برنامه مدیریت سمت تقاضا روی هر گره برابر ۶ در صد بار و در ضریب بار ۱,۴ مقدار مجاز برابر ۱۰ در صد بار هر گره در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نتایج شبیه‌سازی را در این سیستم نشان می‌دهد.



شکل (۱): سیستم ۶ شینه IEEE [۱۳]

همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۱) سه حالت ضریب بار مختلف برای تجزیه و تحلیل و دو سناریو با و بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت مدیریت سمت تقاضا در سه ضریب بار مختلف هیچگونه قطع باری رخ نداده است که به موجب آن هم هزینه قطع بار صفر شده است. اما در سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا تنها حالت ضریب بار متعادل قطع باری نخواهد بود و با افزایش بار در شبکه سیستم دچار قطع بار خواهد شد، مشاهده می‌شود که در سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا دو حالت ضریب بار ۱,۲ و ۱,۴ دچار قطع بار شده است.

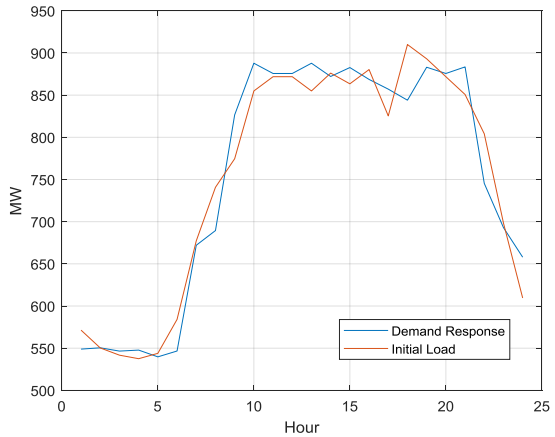
طبق جدول (۱) نیز هزینه کل (تابع هدف مسئله) برای سناریو با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا برای سه ضریب بار پیشنهادی به ترتیب برابر {۴۵۶۷۷۰، ۵۵۷۵۲۰ و ۶۵۱۶۲۰} دلار شده است. از طرفی دیگر هزینه کل برای سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا برای سه ضریب بار به ترتیب برابر {۴۶۰۰۴۰، ۵۶۱۸۱۰ و ۶۶۲۹۴۰} دلار می‌باشد، که به ترتیب نشان از کاهش {۳۲۷۰، ۴۲۹۰، ۱۱۳۲۰} دلاری به ازا یک روز در سناریو در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا می‌باشد.

شکل (۲) نیز مقایسه بار اولیه با بار تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۶ شینه با حالت ضریب بار ۱,۴ را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است خط آبی بار حاصل شده از برنامه مدیریت سمت تقاضا و خط قرمز بار اولیه سیستم در طول ۲۴ ساعت می‌باشد. نتنها برنامه مدیریت سمت تقاضا طبق جدول (۱) سبب کاهش هزینه کل مسئله شد بلکه طبق شکل (۲) مشخص است که پیک بار را در طول ۲۴ ساعت کاهش داده و موجب مسطح شدن سطح بار از ساعت ۱۰ الی ۲۱ شده است.

جدول (۱): مقایسه نتایج شبکه ۶ شینه با و بدون مدیریت سمت تقاضا

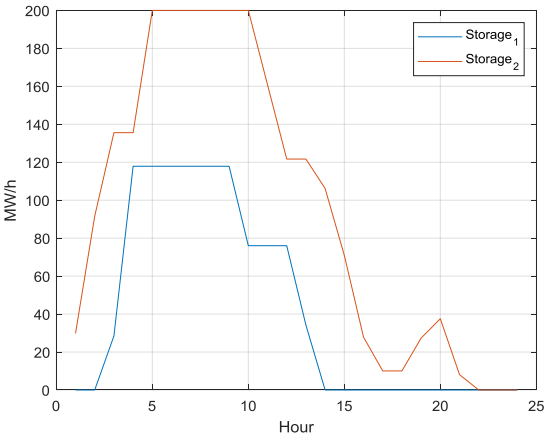
	با مدیریت سمت تقاضا			بدون مدیریت سمت تقاضا		
ضریب بار	۱	۱,۲	۱,۴	۱	۱,۲	۱,۴
هزینه بهره-برداری باتری ($)	۳۴۵,۳۹	۳۲۵,۷۷	۸۴,۹	۴۵۳,۳۳	۵۶۸,۴۹	۱۶۸,۵۴
هزینه تولید واحدها ($)	۴۳۲۳۴۰	۵۲۰۰۶۰	۶۰۶۲۸۰	۴۳۳۶۷۰	۵۲۲۵۸۰	۶۰۰۶۴۰
هزینه آلایندگی واحدها ($)	۲۴۰۸۶	۳۷۱۳۷	۴۵۲۶۰	۲۵۹۱۳	۳۷۹۱۳	۴۵۵۱۲
هزینه قطع بار ($)	۰	۰	۰	۰	۷۴۸,۲۳	۱۶۶۱۸
هزینه کل ($)	۴۵۶۷۷۰	۵۵۷۵۲۰	۶۵۱۶۲۰	۴۶۰۰۴۰	۵۶۱۸۱۰	۶۶۲۹۴۰

شکل (۳) و (۴) به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت انرژی باتری‌ها با و بدون مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۶ شینه با در نظر گرفتن ضریب بار ۱ می‌باشد. این شکل‌ها وضعیت شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها را در دوره بهینه سازی ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. بدیهی است که با افزایش مقدار توان این خطوط صعودی و با دشارژ شدن باتری نزولی شده‌اند.

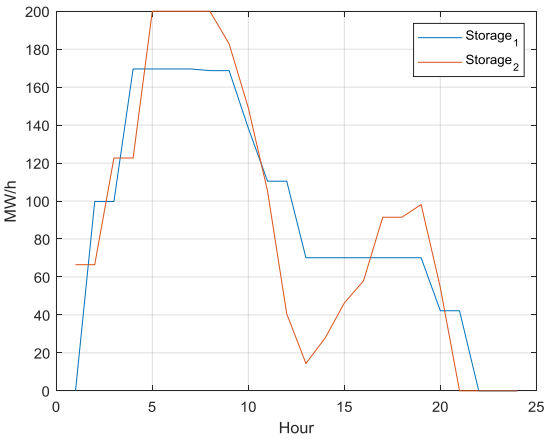


شکل (۲): مقایسه بار اولیه با بار تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۶ شینه (ضریب بار ۱,۴)

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



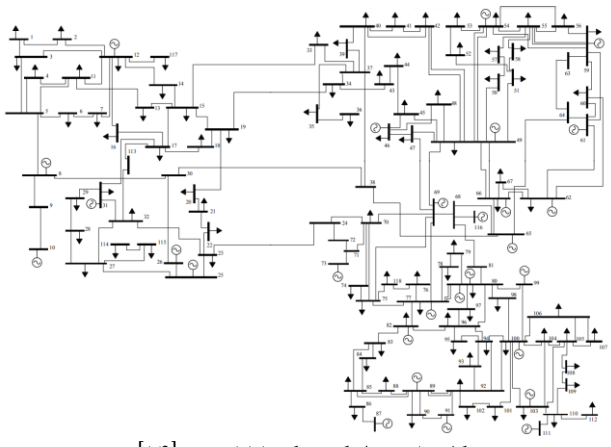
شکل (۳): وضعیت انرژی باتری‌ها با مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۶ شینه (ضریب بار ۱)



شکل (۴): وضعیت انرژی باتری‌ها بدون مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۶ شینه (ضریب بار ۱)

۲-۳- شبکه ۱۱۸ شینه IEEE

اطلاعات شبکه ۱۱۸ شینه در نظر گرفته شده از مرجع [۱۴] بدست آمده است. شماتیک این شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این شبکه شامل ۵۴ واحد ژنراتوری می‌باشد. در این شبکه بیست واحد سیستم ذخیره‌ساز باتری قرار دارد. پارامترهای مربوط به واحدها و سیستم ذخیره‌ساز در [۱۴] آمده است. حداکثر ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌ساز برابر ۵۰۰ مگاوات و هزینه بهره‌برداری برابر ۰٫۵ دلار به ازا هر مگاوات در نظر گرفته شده است. سه سناریو ضریب بار متفاوت ۱، ۱٫۲ و ۱٫۴ برای تجزیه و تحلیل داده در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): شماتیک شبکه ۱۱۸ شینه [۱۴]

همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۲) سه حالت ضریب بار مختلف برای تجزیه و تحلیل و دو سناریو با و بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت مدیریت سمت تقاضا در دو ضریب بار ۱ و ۱٫۲ هیچگونه قطع باری رخ نداده است که به موجب آن هم هزینه قطع بار صفر شده است. اما در سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا تنها حالت ضریب بار متعادل قطع بار ندارد و با افزایش بار در شبکه سیستم دچار قطع بار خواهد شد، مشاهده می‌شود که در سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا دو حالت ضریب بار ۱٫۲ و ۱٫۴ دچار قطع بار شده است.

طبق جدول (۲) نیز هزینه کل (تابع هدف مسئله) برای سناریو با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا برای سه ضریب بار پیشنهادی به ترتیب برابر {۲,۲۹۸، ۲,۹۶۷۹ و ۹,۴۱۰۸} میلیون دلار شده است.

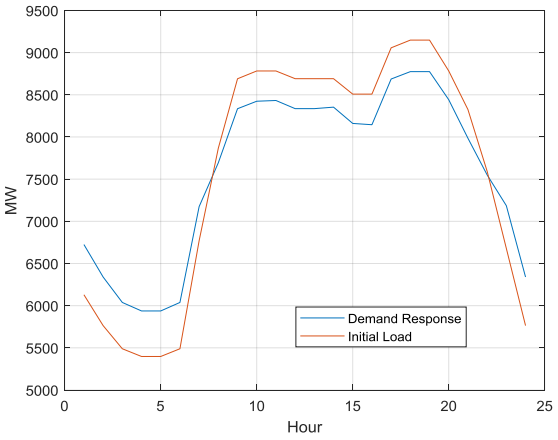
از طرفی دیگر هزینه کل برای سناریو بدون در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا برای سه ضریب بار به ترتیب برابر {۲,۳۱۶۴، ۳,۲۲۷۷ و ۱۱,۰۷۷} میلیون دلار می‌باشد، که به ترتیب نشان از کاهش {۰,۰۱۸۴، ۰,۲۵۹۸، ۱,۶۶۶۲} میلیون دلاری به ازا یک روز در سناریو در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا می‌باشد.

شکل (۶) نیز مقایسه بار اولیه با بار تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۱۱۸ شینه با حالت ضریب بار ۱٫۴ را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است خط آبی بار حاصل شده از برنامه مدیریت سمت تقاضا و خط قرمز بار اولیه سیستم در طول ۲۴ ساعت می‌باشد. نتنها برنامه مدیریت سمت تقاضا طبق جدول (۱) سبب کاهش هزینه کل مسئله شد بلکه طبق شکل (۲) مشخص است که پیک بار را در طول ۲۴ ساعت کاهش داده و موجب مسطح شدن سطح بار از ساعت ۱۰ الی ۲۱ شده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول (۲): مقایسه نتایج شبکه ۱۱۸ شینه با و بدون مدیریت سمت تقاضا

	با مدیریت سمت تقاضا			بدون مدیریت سمت تقاضا		
ضریب بار	۱	۱,۲	۱,۴	۱	۱,۲	۱,۴
هزینه بهره‌برداری ($ تا ۲۴ ساعت)	۳۷۴,۵۲	۵۶۸۵,۱	۵۴۱۱,۵	۱۳۳۵,۶	۸۳۲۹,۸	۷۸۷۷,۹
هزینه تولید واحدها (M$)	۱,۶۹۳۶	۲,۲۴۷۳	۲,۸۲۵۴	۱,۷۱۱۲	۲,۳۷۸	۲,۷۳۲۴
هزینه آلایندگی واحدها (M$)	۰,۶۰۳۹۷	۰,۷۱۴۸۸	۰,۷۵۳۵۴	۰,۶۰۳۹۱	۰,۷۰۸۸۸	۰,۷۴۴۰۳
هزینه قطع بار (M$)	۰	۰	۵,۸۲۶۵	۰	۰,۱۳۲۵۱	۷,۵۹۳۲
هزینه کل (M$)	۲,۲۹۸	۲,۹۶۷۹	۹,۴۱۰۸	۲,۳۱۶۴	۳,۲۲۷۷	۱۱,۰۷۷



شکل (۶): مقایسه بار اولیه با بار تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در شبکه ۱۱۸ شینه (ضریب بار ۱,۴)

۴- نتیجه

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) برای مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند ارائه شد. مدل پیشنهادی با هدف کاهش هزینه متغیر، بی باری، راه‌اندازی و خاموشی واحدهای نیروگاهی، کاهش هزینه شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی (باتری)، کاهش هزینه قطع بار شبکه و همچنین کاهش آلایندگی واحدها برای یک دوره ۲۴ بهینه‌سازی ساعته ارائه گردید، همچنین مدل پخش بار بهینه جریان مستقیم (DCOPF) برای تجزیه و تحلیل شبکه در نظر گرفته شد. مدل پیشنهادی در محیط نرم‌افزاری MATLAB پیاده‌سازی شد و با استفاده از حل‌کننده قدرتمند Gurobi حل گشت. به منظور صحت‌سنجی دو شبکه تست استاندارد ۶ و ۱۱۸ شینه IEEE با در نظر گرفتن سناریو رشد با ۱,۲ و ۱,۴ در نظر گرفته شد، که نتایج نشان داد مدیریت سمت تقاضا و همچنین شارژ و دشارژ بهینه باتری می‌تواند تاثیر مطلوبی در کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلایندگی داشته باشد، لذا این مدل ارائه شده برای مسئله مشارکت واحدها را اثبات می‌کند.

مراجع

[۱] براتی, حسن, فتحی, اسماعیل, نصیر, محمد. در مدار قرار گرفتن بهینه واحدهای نیروگاهی حرارتی با استفاده از روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه. روش‌های هوشمند در صنعت برق, ۱۳۹۷; ۹(۳۵): ۶۲-۴۹.

[2] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (p2g) on electrical and gas transmission networks. IEEE Trans Sustain Energy 2015;6:1234–44.

[3] Junkai Liang, Wenyuan Tang,Interval based transmission contingency-constrained unit commitment for integrated energy systems with high renewable penetration, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 119,105853,2020.

[4] Maissa Daadaa, Sara Séguin, Kenjy Demeester, Miguel F. Anjos, An optimization model to maximize energy generation in short-term hydropower unit commitment using efficiency points, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 125,106419,2021

[5] Farhad Fallahi, Pouria Maghouli, Integrated unit commitment and natural gas network operational planning under renewable generation uncertainty, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 117,105647,2020.

[6] Xingquan Ji, Yumin Zhang, Xueshan Han, Pingfeng Ye, Bo Xu, Yongjin Yu, Multi-level interactive unit commitment of regional power system, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 125,106464, 2021.

[7] Seyed-Ehsan Razavi, Ali Esmaeel Nezhad, Hani Mavalizadeh, Fatima Raeisi, Abdollah Ahmadi, Robust hydrothermal unit commitment: A mixed-integer linear framework, Energy,Volume 165, Part B,Pages 593-602, 2018.

[8] Himanshu Anand, Nitin Narang, J.S. Dhillon, Multi-objective combined heat and power unit commitment using particle swarm optimization, Energy,Volume 172,Pages 794-807,2019.

[9] Kyung-bin Kwon, Dam Kim, Enhanced method for considering energy storage systems as ancillary service resources in stochastic unit commitment, Energy,Volume 213,118675, 2020.

[10] Y. Xu, T. Ding, M. Qu and P. Du, "Adaptive Dynamic Programming for Gas-Power Network Constrained Unit Commitment to Accommodate Renewable Energy With Combined-Cycle Units," in *IEEE Transactions on*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Sustainable Energy, vol. 11, no. 3, pp. 2028-2039, July 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2951616.
[11] T. Ding, M. Qu, Z. Wang, B. Chen, C. Chen and M. Shahidehpour, "Power System Resilience Enhancement in Typhoons Using A Three-Stage Day-Ahead Unit Commitment," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, doi: 10.1109/TSG.2020.3048234.
[12] Hamdi Abdi,Profit-based unit commitment problem: review of models, methods, challenges, and future directions, Renewable and Sustainable Energy Reviews,110504, 2020.
[13] A. J. Conejo, L. Baringo, S. J. Kazempour, and A. S. Siddiqui, \Investment in electricity generation and transmission," Cham Zug, Switzerland: Springer International Publishing, vol. 119, 2016.
[14] G. Sun, S. Chen, Z. Wei, K. W. Cheung, and H. Zang, "Corrective security constrain optimal power and gas ow with binding contingency identification," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 2, pp. 1033-1042, 2020.

رزومه



حسین جوکار در نورآباد ممسنی متولد شده است (۱۳۶۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نورآباد ممسنی(۱۳۹۲)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون(۱۳۹۴) و در حال حاضر دانشجو دکتری مهندسی برق-قدرت دانشگاه آزاد واحد مرودشت می‌باشد.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مشارکت واحدها و شبکه‌های هوشمند است.



بهمن بهمنی فیروزی متولد سال ۱۳۵۴ می‌باشد. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه شیراز(۱۳۷۸)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۸۱) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه شیراز(۱۳۹۳) سپری کرده است.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می‌باشد.



محسن سیماب در اقلید متولد شده است (۱۳۶۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه امیرکبیر(۱۳۸۳)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۵) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۹) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه قابلیت اطمینان از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می‌باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Unit Commitment in Smart Grids Considering Demand Side Management and Energy Storage Systems

Hossein Jokar[1], Bahman Bahmani-Firouzi[2], Mohsen Simab[3]

1- PhD student - Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, jokar.hossien@yahoo.com
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, bahman_bah@miau.ac.ir
3- Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, msimab@miau.ac.ir

Abstract: The issue of unit commitment (UC) is one of the most important issues in the electricity market, and with the smartening and restructuring of networks which its goals and variables have undergone changes. In this paper, solving and modeling the problem of unit commitment by considering smart networks is proposed. As we know, in smart grids, there are new issues such as demand side management and energy storage systems (batteries) as well as new goals such as reducing the environmental pollution of the units that must be considered. In this paper, the issue of unit commitment with demand side management modeling along with optimal charging and discharging of battery storage system with the aim of minimizing the economic costs of units and batteries and environmental pollution is presented. The proposed model is a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model that is solved using powerful commercial software such as Gurobi and guarantees optimal global solutions. The proposed model is implemented on two standard IEEE 6 and 118 bus networks, the results of which show the efficiency of the proposed model.

Keywords: Unit commitment, demand side management, energy storage system, mixed integer linear programming

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]