نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۱-۱۴

مدیریت انرژی بهینه اتفاقی یک ریزشبکه DC دارای خودروهای الکتریکی با هدف کاهش همزمان هزینه تولید و میزان انتشار آلایندگی

سیده فاطمه حسینی سده[۱]، احمد قاسمی (نویسنده مسئول)[۲]، ایمان پورفر

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳ / ۱۲ / ۲۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴ / ۰۳ / ۱۸

کلمات کلیدی:
ریزشبکه DC
خودروی الکتریکی
مدیریت انرژی
گازهای گلخانه‌ای
G2V/V2G

چکیده

در این مقاله یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی یک ریزشبکه DC دارای خودروهای الکتریکی با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای به‌صورت همزمان ارائه شده است. این ریزشبکه DC، از سیستم فتوولتائیک (PV)، میکروتوربین (MT)، دیزل ژنراتور (DG)، سلول سوختی (FC) و باتری تشکیل شده است که انرژی مورد نیاز بار را تأمین می‌کنند. همچنین در این ریزشبکه دو پارکینگ خودروی الکتریکی سبک و سنگین وجود دارد که وظیفه تأمین انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی را بر عهده دارند. به منظور بهبود سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی جهت کمینه‌سازی به صورت همزمان هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و تولید آلایندگی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از قابلیت G2V/V2G پارکینگ خودروهای الکتریکی موجود در این ریزشبکه استفاده شده است. مدل‌سازی ریزشبکه DC پیشنهادی به صورت دقیق بوده و پخش بار الکتریکی در آن لحاظ شده است. شبیه سازی‌ها و مطالعات عددی این مقاله در نرم افزار گمز انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی به خوبی می‌تواند سبب کاهش هزینه تأمین انرژی الکتریکی و همچنین میزان تولید و انتشار آلایندگی‌های گلخانه‌ای به صورت همزمان شود.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول
۲. دانشیار مهندسی برق قدرت ، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول aghasemi@jsu.ac.ir
۳. استادیار مهندسی برق قدرت ، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

۱ مقدمه

امروزه ریزشبکه DC[۳] به عنوان یک مفهوم توسعه یافته در راستای نیل به اهدافی از قبیل کاهش هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی ارائه شده است. عدم نیاز به کنترل توان راکتیو و فرکانس و همچنین DC بودن توان خروجی غالب ژنراتورهای تولید پراکنده نظیر خورشید، سبب افزایش توجه به ریزشبکه DC شده است (السایدˢ و همکاران,۲۰۱۵: ۴۱۷-۴۰۷). ریزشبکه DC می‌تواند ژنراتورهای خود را با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلایندگی و ایجاد هماهنگی میان تولید واحدها مدیریت کند (الکاس[۵] و همکاران,۲۰۱۴: ۱۵۳-۱۳۲). از سوی دیگر ریز شبکه DC می‌تواند بیش از پیش امکان تو سعه بکارگیری خودروهای الکتریکی (EVP[۶]) را به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش نیاز به سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش آلودگی زیست محیطی فراهم کند (الولی سالم[۷] و همکاران، ۲۰۲۵: ۱۰۰۰۱۹).

بنابراین، در این مقاله یک استراتژی جدید مدیریت انرژی ریزشبکه DC با هدف کاهش هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و آلایندگی ارائه می‌شود. بدین منظور از قابلیت G2V/V2G[۸] در ریزشبکه DC استفاده شده است.

با توسعه به کارگیری تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های نو و افزایش رویکرد استفاده از ریزشبکه DC، بررسی معایب و مزایای روش‌های مختلف برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل ریزشبکه DC بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (اسماعیل[۹] و صالح,۲۰۲۱: ۳۶۱۵۴-۳۶۱۷۲). اتصال مستقیم منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه برق به دلیل ماهیت متغیر این منابع امری چالش برانگیز است که جهت رفع این چالش از ریزشبکه DC استفاده می شود (هوشایری[۱۰] و همکاران,۲۰۲۰). اتصال گروهی از بارها و تولیدات پراکنده در قالب یک ریزشبکه می‌تواند هزینه تأمین انرژی الکتریکی را کاهش دهد (فیصل[۱۱] و کویو,۲۰۰۷: ۷۴-۷۸). همچنین در بحث کمینه کردن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریزشبکه DC می‌تواند موثمر ثمر واقع شود (تنفن[۱۲] و فیناردی,۲۰۱۵: ۲۸-۱۹). کمینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلایندگی‌های گلخانه‌ای با مطالعه بر روی یک ریز شبکه DC در (مجدی[۱۳] و علی, ۲۰۲۱) انجام گرفته است. البته اهمیت حضور خودروی الکتریکی که به دلایل زیست محیطی استفاده از آن افزایش یافته است، در این پژوهش ارزشمند لحاظ نشده است (مجدی[۱۴] و علی, ۲۰۲۱). با توجه به گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی بلأخص در کشورهای توسعه یافته، برنامه‌ریزی مناسب جهت استفاده از ظرفیت ذخیره سازی انرژی این خودروها می‌تواند به مدیریت انرژی ریز شبکه کمک کند. این امر از طریق تجمیع انرژی حاصل از دشارژ خودروی الکتریکی در پارکینگ مخصوص به آن محقق خواهد شد (شکوهمند و قاسمی, ۱۴۰۰). توجه به موضوع آلایندگی‌های خودروهای مبتنی بر سوخت فسیلی امری مهم است. میزان تولید Co_2 ناشی از این خودروها سالانه خسارتی بالغ بر صدها دلار وارد می‌کند (نژاد ملایری و جعفرزاده,۱۳۹۵). البته عدم قطعیت‌های مربوط به تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های نو نیز باید در مدل ارائه شده در نظر گرفته شود (کومار[۱۵] و همکاران، ۲۰۲۵: ۱۱۱۰۹۳). استفاده از باتری جهت ذخیره انرژی و کاهش چالش‌های مرتبط با عدم قطعیت واحدهای تجدید

1Direct Current
4 Elsayed
5 Eklas
4 Electric Vehicle Parking Lot
7 Elvely Salem
6 Grid-Vehicle-Grid
7 Al-Ismail
10 Hushairi
11 Faisal
12 Tenfen
13 Magdi
14 Magdi
15 Kumar

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

پذیر در مطالعات پیشین بررسی شده است (سینگ و همکاران، ۲۰۲۵: ۱۰۱۴۵۱). ریز شبکه DC می‌تواند یک بستر بسیار مناسب برای توسعه استفاده از خودروهای الکتریکی و بهره‌برداری از ویژگی‌های آن‌ها جهت کنترل هزینه و انتشار آلایندگی باشد.

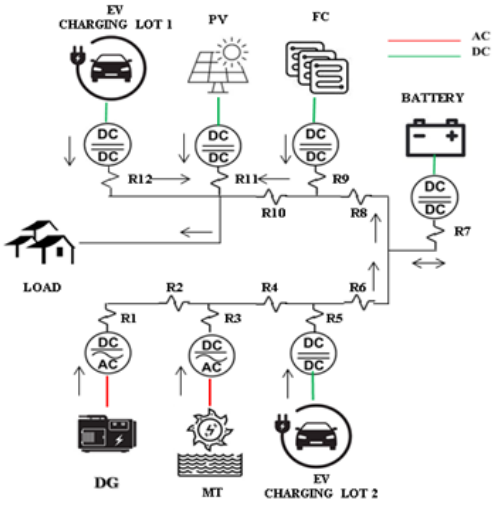
بنابراین، هدف این مقاله آن است که با توجه به مزایای مختلفی که پیش‌تر در خصوص ریزشبکه DC با حضور خودروهای الکتریکی مطرح شد، یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی ریزشبکه DC با هدف بهینه‌سازی همزمان هزینه تولید و آلایندگی ارائه دهد.

نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

۱. برنامه‌ریزی بهینه جهت بهره‌برداری ریز شبکه DC با استفاده از قابلیت G2V/V2G خودروهای الکتریکی با هدف بهینه سازی هزینه و میزان انتشارآلایندگی
۲. در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر در برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه DC
۳. ارائه یک مدل دقیق از ریزشبکه DC با در نظر گرفتن تلفات خطوط در حضور باتری و خودروهای الکتریکی سبک و سنگین.

۲. مبانی نظری

نمای کلی ریزشبکه مدنظر در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. مطالعات بر روی یک ریزشبکه DC متشکل از میکروتوربین (MT[1])، دیزل ژنراتور (DG[2])، فیو سل (FC[3])، سیستم فتوولتائیک (PV[4])، باتری (BT[5]) و همچنین دو پارکینگ خودروی الکتریکی (EV[6]) است. کابل‌های این ریزشبکه با ۱/۵ برابر جریان نامی و با افت ولتاژ کمتر از ۵ درصد از هر واحد تولیدی به بار طراحی شده‌اند (السائید و همکاران,۲۰۱۵: ۴۰۷-۴۱۷). تنوع این ژنراتورهای تولید پراکنده باعث افزایش در دسترس بودن توان در غیاب یک یا چند منبع انرژی می‌شود (اسماعیل و صالح,۲۰۲۱: ۳۶۱۵۴-۳۶۱۷۲).



شکل ۱ ریزشبکه DC مورد نظر

۳. روش تحقیق

1 Microturbin
2 Diesel Generator
3 Fuelcell
4 Photovoltaic
5 Battery
6 Electric Vehicle

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

معادلات مربوط به بهینه‌سازی هزینه، میزان انتشار آلایندگی و بهینه‌سازی هر دو مورد به صورت همزمان در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱. بهینه‌سازی هزینه‌ها

در بحث بهینه سازی هزینه، هدف کمینه سازی هزینه تأمین انرژی الکتریکی در طول روز می‌با شد که در رابطه (۱) آورده شده ا ست. این تابع هزینه شامل هزینه تولید در رابطه (۲) است (ذاکری و سیری,۲۰۱۵: ۵۹۶-۵۶۹). هزینه کلی روشن/خاموش شدن واحدهای تولیدی در رابطه (۳) است (مقدم و همکاران,۲۰۱۱: ۶۵۰۷-۶۴۹۰)

$$fc_g(h) = C_g(h) + CS_g(h) \quad (۱)$$

$$C_g(h) = \alpha_g P_g^2(h) + \beta_g P_g(h) + \gamma_g \quad (۲)$$

$$CS_g(h) = \delta D_g \left|U_g(h) - U_g(h-1)\right| \quad (۳)$$

در رابطه(۳) $P_g(h)$ نمادی از مقدار توان تولید شده از واحد تولیدیMT ، FC، DG و BT است.

۳-۲. بهینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

در اینجا هدف کمینه‌سازی میزان انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای از تمامی واحدهای تولید است که در رابطه (۴) آورده شده است (رضوانی و همکاران,۲۰۱۵: ۲۲۶-۲۱۶)

$$fE_g(h) = fCo_{2_g}(h) + fSO_g(h) + fNO_g(h) \quad (۴)$$

در این رابطه $fCo_{2g}(h)$، $fSO_g(h)$ و $fNO_g(h)$ به ترتیب میزان انتشار گازهای CO_2، SO و NO از هر واحد تولید توان در ساعت h است. همچنین $fE_g(h)$ مقدار کل آلایندگی منتشر شده از هر واحد تولیدی در ساعت h را نشان می‌دهد.

۳-۳. بهینه‌سازی هزینه تأمین انرژی الکتریکی و میزان انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای به صورت همزمان

به منظور کمینه سازی هزینه و میزان انتشار آلایندگی به صورت همزمان باید هر دو شاخص دارای یک مبنا یکسان با شند. به همین دلیل در این مقاله هزینه مقدار انت شار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای CoE محا سبه شده و در کنار هزینه تولید انرژی الکتریکی در رابطه (۵) قرار گرفته است. رابطه (۶) تابع هدف cost است که شامل هزینه تولید انرژی الکتریکی CE و هزینه انتشار آلایندگی گاز گلخانه‌ای fC است.

$$CE_g(h) = fE_g(h) \times CoE_g(h) \quad (۵)$$

$$cost_g(h) = CE_g(h) + fC_g(h) \quad (۶)$$

۳-٤. قیود سیستم

معادله قید تعادل توان در رابطه (۷) آورده شده ا ست که موجب تعادل میان بار P_{load} ،تلفات P_{loss} و تولیدات می شود. به منظور جلوگیری از عملکرد مخرب ژنراتورهای احتراق داخلی (DG و MT) بار آنها باید ما بین ۲۰٪ و ۱۰۰٪ بار نامی ژنراتور با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) باشد، در حالی که بار FC با ۵٪ و۱۰۰٪ بار از رابطه ۱۰ محدود شده است. علاوه بر آن، تعداد دفعات شروع و توقف هر یک باید با حداکثر تعداد مجاز توقف و شروع با استفاده از رابطه (۱۱) محدود شود (چن[1] و همکاران,۲۰۱۹).

$$\sum P_g(h) - P_{loss}(h) = P_{load}(h) \quad (۷)$$

$$\left(P_{DG_min} \le P_{DG}(h) \le P_{DG_max}\right)U_{DG} \quad (۸)$$

$$\left(P_{MT_min} \le P_{MT}(h) \le P_{MT_max}\right)U_{MT} \quad (۹)$$

$$\left(P_{FC_min} \le P_{FC}(h) \le P_{FC_max}\right)U_{FC} \quad (۱۰)$$

$$N_{x_{start/stop}} \le N_{x_max_start/stop} \quad (۱۱)$$

یکی از عواملی که بر باتری اثر گذار است، تلفات مبدل DC است که از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. به دلیل آنکه این تلفات اثر مستقیم بر شارژ و دشارژ باتری دارد، مقدار واقعی شارژ و دشارژ باتری بعد از در نظر گرفتن این تلفات به ترتیب برابر با رابطه های (۱۳) و (۱۴) خواهد بود. رابطه (۱۵) بیانگر سطح انژی باتری ا ست (مجدی و علی, ۲۰۲۱). در نظر داریم که راندمان شارژ و د شارژ باتری با هم برابر ا ست. در نامساوی‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت‌های مربوط به نرخ شارژ، دشارژ و میزان ظرفیت باتری در نظر گرفته شده است. رابطه ۱۹ بیانگر آن است که در ابتدا و انتهای دوره باید سطح انرژی باتری برابر باشد (سایت هومر,۲۰۱۸).

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

$$P_{bt-loss}(h) = 0.0015P_{bt}^2(h) + 0.01P_{bt}(h) + 0.06 \quad (۱۲)$$
$$P_{btcharge}(h) = P_{btch}(h) - P_{bt-loss}(h) \quad (۱۳)$$
$$P_{btdischarge}(h) = P_{btdch}(h) + P_{bt-loss}(h) \quad (۱۴)$$
$$W_{bt}(h) = W_{bt}(h-1) + P_{btcharge}(h) - P_{btdischarge}(h) \quad (۱۵)$$
$$\left(P_{btcharge-min} \le P_{btcharge}(h) \le P_{btcharge-max}\right)U_{bt} \quad (۱۶)$$
$$\left(P_{btdischarge-min} \le P_{btdischarge}(h) \le P_{btdischarge-max}\right)U_{bt} \quad (۱۷)$$
$$W_{bt-min} \le W_{bt}(h) \le W_{bt-max} \quad (۱۸)$$
$$W_{bt}(h = h_0) = W_{bt}(h = T) \quad (۱۹)$$
$$T \to 24h$$

برای محاسبه سطح انرژی هر دو پارکینگ خودرو الکتریکی از رابطه (۲۰) استفاده شده است (درخشنده و همکاران,۲۰۱۵: ۱۳۶۵-۱۳۴۹).

$$W_{EVP}(h) = W_{EVP}(h-1) + \eta^{EVPcharge} \times P_{EVPcharge} \times \Delta h - \frac{1}{\eta^{EVPcharge}} \times P_{EVPdischarge} \times \Delta h \quad (۲۰)$$

۵-۳. مدل‌سازی عدم قطعیت به روش تخمین دو نقطه‌ای

در روش تخمین دو نقطه‌ای، برای مدل‌سازی N متغیر تصادفی تنها نیاز به حل سناریوهای N×۲ می‌باشد. بنابراین، این رویکرد در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها سریع و قوی بوده و بار محاسباتی را کاهش می‌دهد. در این روش فرض بر این است که S مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی ($S_1,S_2,\ldots,S_n,S_N$) با مقدار میانگین μ و انحراف معیار σ است. Q به عنوان یک تابع چگالی احتمال نرمال به صورت Q=F(S) معرفی می شود. در این روش ابتدا باید عدم تقارن متغیر تصادفی S_n که همان ν_n است، از رابطه (۲۱) به دست آید. سپس باید مکان استاندارد φ برای هر متغیر تصادفی در نقطه a به ترتیب از رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) محاسبه گردد. وزن‌های متغیر تصادفی w است که با استفاده از رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) محاسبه شده است. بعد از هر محاسبه، مقدار متغیر نهایی (E(Q)) از رابطه (۲۶) به دست می‌آید (مورالس[1] و همکاران,۲۰۰۷: ۱۶۰۱-۱۵۹۴).

$$\nu_n = \frac{E(S_n - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (۲۱)$$
$$\varphi_{n,1} = \frac{\nu_n}{2} + \sqrt{N + \left(\sqrt{\frac{\nu_n}{2}}\right)^2} \quad (۲۲)$$
$$\varphi_{n,2} = \frac{\nu_n}{2} - \sqrt{N + \left(\sqrt{\frac{\nu_n}{2}}\right)^2} \quad (۲۳)$$
$$w_{n,1} = -\frac{1}{N}\frac{\varphi_{n,2}}{\varphi_{n,1} - \varphi_{n2}} \quad (۲۴)$$
$$w_{n,2} = \frac{1}{N}\frac{\varphi_{n,1}}{\varphi_{n,1} - \varphi_{n,2}} \quad (۲۵)$$
$$E(Q) \cong E(Q) + \sum w_{n,a}\, Q_{n,a} \quad (۲۶)$$

٤. توصیف داده‌ها

در این بخش مطالعات عددی انجام شده است تا کارایی استراتژی پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. جهت حل مدل پیشنهادی از نرم افزار بهینه‌سازی GAMS و با استفاده از حل‌گر CPLEX استفاده شده است.

ریزشبکه DC پیشنهادی در طی یک شبانه‌روز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این ریزشبکه شامل واحدهای تولید توان فتوولتائیک، میکروتوربین، دیزل‌ژنراتور و فیوسل است که از هرکدام یک واحد در ریزشبکه وجود دارد. همچنین یک باتری و دو پارکینگ خودروی الکتریکی نیز موجود می‌باشد (مطابق شکل۱). پارکینگ ۱ شامل ۱۱ خودرو الکتریکی سبک است که از ساعت ۷ الی ۱۸ و پارکینگ ۲ شامل ۵ خودرو الکتریکی سنگین همچون تراک‌های حمل بار است که از ساعت ۱۹ الی ۶ صبح در جایگاه حضور دارند و بقیه ساعات از جایگاه خارج هستند. پارکینگ خودروهای الکتریکی بدون آلودگی در نظر گرفته شده است (درخشنده و همکاران,۲۰۱۵: ۱۳۶۵-۱۳۴۹). علاوه بر این، چون سیستم فتوولتائیک PV یک سیستم پاک و بدون هزینه است، در بحث بهینه‌سازی، هزینه آن حذف شده است (مجدی

1 Morales

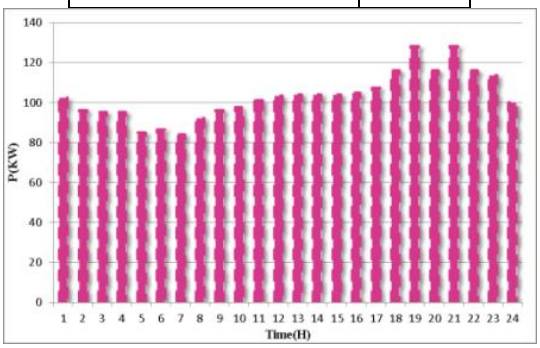
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

و علی, ۲۰۲۱). به منظور جلوگیری از عملکرد مخرب ژنراتورهای احتراق داخلی میکروتوربین و دیزل‌ژنراتور بین ۲۰٪ الی ۱۰۰٪ بار نامی و FC ما بین ۵٪ الی ۱۰۰٪ بار نامی فعالیت دارند (مقدم و همکاران,۲۰۱۱: ۶۵۰۷-۶۴۹۰). در شـــکل ۲ پروفیل بار ریزشـــبکه بدون در نظر گرفتن شارژ خودروها تر سیم شده‌ا ست. در جدول ۱ با اندکی تغییر مقدار مقاومت‌های م سیر در نظر گرفته شده‌اند (وزارت نیرو و انرژی تجدید پذیر ک شور م صر). ضرایب هزینه واحدهای تولید توان در جدول ۲ آورده شده‌ا ست (ال ساید و همکاران,۲۰۱۵: ۴۱۷-۴۰۷). هزینه آلایندگی آلاینده‌های گلخانه‌ای در جدول ۳ آورده شده‌است (تراز نامهٔ انرژی،۱۳۹۵).

داده‌های ســیســتم فتوولتائیک در جدول ۴، داده‌های واحدهای تولیدی در جدول ۵ و داده‌های پارکینگ‌ها و باتری در جدول ۶ آورده شــده است (مورالس و همکاران,۲۰۰۷: ۱۶۰۱-۱۵۹۴).

جدول۱ مقدار مقاومت‌ها

R1=R3=R9=R11=۲×۴/۸۲۵	R2=۲×۱۹/۳
R5=R7=R12=۲×۷/۷۴۵	R4=۲×۱۸/۸
R8=R10=۲×۵۸	R6=۲×۹/۴



شکل۲ پروفیل بار

جدول۲ ضرایب هزینه تولید

واحدها	α_g	β_g	δ_g
DG	۰/۰۰۰۳۷۲	۰/۰۷۲۱۴	۰/۶۴۳۲۵
MT	۰/۰۰۰۲۷۹	۰/۰۶۰۹۵	۰/۳۳۷۱۲
BT	۰/۰۰۰۱۰۹۵	۰/۰۷۳۷۳	۰/۰۰۴۳۸
FC	۰/۰۰۰۰۳۱۵	۰/۱۰۶۵۷۵	۰/۰۲۱
EVP۱و۲	۰/۰۰۰۱۰۹۵	۰/۰۷۳۷۳	۰/۰۰۴۳۸

جدول ۳ هزینه آلایندگی به ازای هرکیلوگرم گاز گلخانه‌ای

گاز گلخانه‌ای (KG)	CE ($)
Co_2	۰/۰۰۱۶۱
SO	۰/۲۹۳۶
NO	۰/۰۹۶۵

جدول ۴ داده‌های PV

H	μ_{PV}	σ_{PV}
۹	۲۱	۰/۲۵۲
۱۰	۳۰	۰/۴۲۳
۱۱	۴۰	۰/۶۸۴
۱۲	۴۳	۰/۷۷۴
۱۳	۴۵	۰/۹
۱۴	۴۴	۰/۸۳۶
۱۵	۳۶	۰/۴۴۸
۱۶	۳۲	۰/۴۴۸
۱۷	۲۴	۰/۴۱۶
۱۸	۱۳	۰/۱۴۳

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

۰/۰۵۵	۵	۱۹
۰	۰	۱ الی ۸
۰	۰	۲۰ الی ۲۴

جدول ۵ داده‌های واحدهای تولید

باتری	PV	FC	MT	DG	واحدها
-۱۰	۰	۲/۵	۹	۹/۶	MIN(KW)
۱۰	۵۰	۵۰	۴۵	۴۸	MAX(KW)
۰	۰	۰/۲۶۳۶۵	۰/۱۸۲۲۵	۰/۲۶۶۴	δ_g($)
۵		۵۴۰	۷۱۸/۲	۶۴۴/۴	Co_2 (KG)
۰/۰۰۰۲	۰	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۳۶	۰/۲۰۴۳	SO (KG)
۰/۰۰۱	۰	۰/۰۰۷۶۵	۰/۱۹۸	۹/۸۱۰	NO (KG)

جدول ۶ داده‌های پارکینگ‌ها و باتری

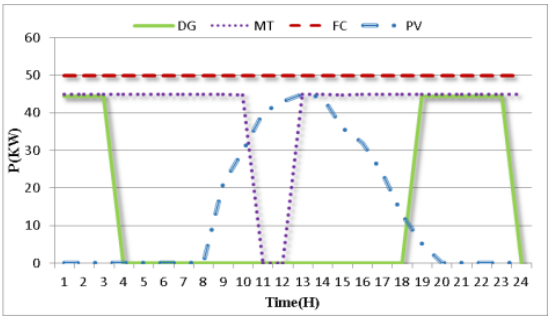
خودروهای پارکینگ ۲	خودروهای پارکینگ ۱	باتری	واحد ها
۰	۰	۰	CH^{min}(KW)
۱۴	۴	۱۰	CH^{max}(KW)
۰	۰	۰	DCH^{min}(KW)
۱۴	۴	۱۰	DCH^{max}(KW)
۸/۵	۲/۴	۱۵	SOC^{min}(KWh)
۸۵	۲۴	۵۰	SOC^{max}(KWh)
۱۷	۴/۸	۳۰	SOC^{start}(KWh)
۶۸	۱۹/۲	۳۰	SOC^{end}(KWh)

۵. نتایج اجرای مدل

در این قسمت ابتدا ریز شبکه DC بدون استفاده از قابلیت G2V/V2G بررسی شده است و در حالت بعد با در نظر گرفتن ویژگی شارژ در خودرو الکتریکی مطالعات تکمیل شده است.

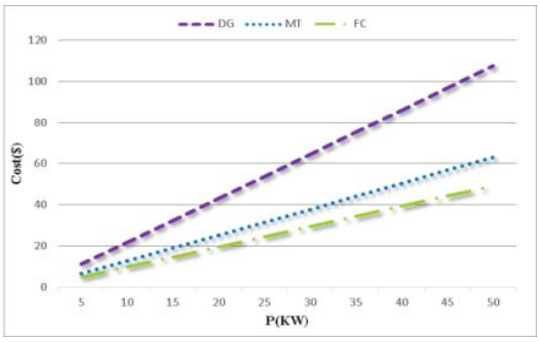
۵-۱. مطالعه موردی اول: برنامه‌ریزی بهینه یک ریزشبکه DC بدون در نظر گرفتن قابلیت G2V/V2G

از انجایی که اولویت تولید توان واحدها تابع هدف یعنی کاهش همزمان هزینه و آلایندگی است، بنابراین نمودار هزینه واحدها در شکل ۳ نمایش داده شده است. طبق نمودار مشاهده می شود که واحد FC کمترین هزینه و واحد DG بیشترین هزینه جهت تولید توان را دارند. میزان تولید واحدها در مطالعه موردی اول در شکل ۴ آورده شده است.



شکل۳ هزینه تولید توان واحدها

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

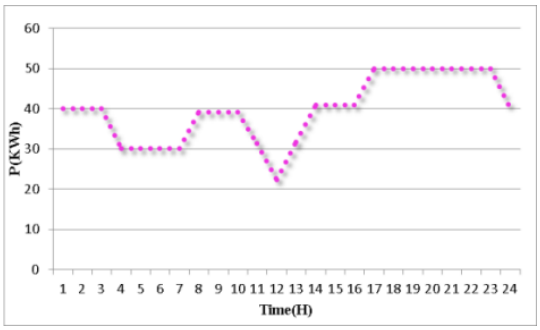


شکل ۴ میزان تولید واحدها

همانطور که در شکل ۴ مشخص است در تمام ساعات FC با حداکثر ظرفیت تولید توان داشته است زیرا این واحد تولید ارزانتری نسبت به واحدهای MT و DG دارد. اولویت دوم تولید توان در جهت تأمین بار ریزشبکه بر عهده MT بوده است زیرا این واحد نیز به نسبت DG برق ارزانتری تولید می‌کند بنابراین در تمامی ساعات بغییر از ساعات ۱۱ و ۱۲ تولید توان انجام داده است. در ساعات ابتدا و انتهای روز (۳-۱ و ۱۹-۲۴) از انجایی که واحد PV تولید توان ندارد و بار الکتریکی از مجموع حداکثر تولیدات واحدهای FC و MT بیشتر بوده است از این رو واحد DG جهت تأمین بار روشن شده است.

شکل ۵ میزان شارژ و دشارژ باتری

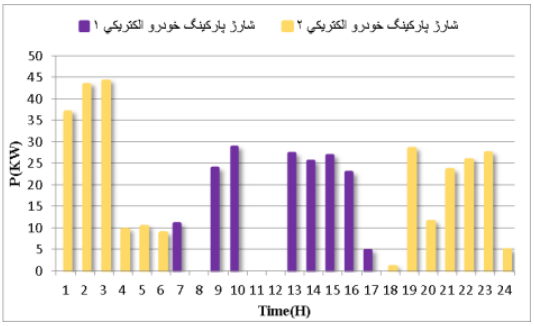
نحوه عملکرد باتری در شکل ۵ نشان داده شده است. در ساعاتی که مقدار ظرفیت تولید واحدهای ارزان‌تر بیشتر از بار ریزشبکه بوده، باتری شارژ شده است و در ساعاتی که مجموع ظرفیت واحدهای ارزان کمتر از بار ریزشبکه است دشارژ گردیده است. در واقع با این عمل، باتری در ساعات کم‌باری تولیدات واحدهای ارزان را ذخیره کرده و با دشارژ شدن در ساعات پرباری از تولید توان واحدهای گران‌تر جلوگیری نموده است. به عنوان مثال در ساعات ۲۴ بار الکتریکی ریزشبکه از مجموع ظرفیت واحدهای FC و MT بیشتر و در این ساعت تولید PV نیز صفر بوده ا ست بنابراین برای تامین بار ریز شبکه باید واحد DG تولید توان انجام می داد اما در این ساعت باتری د شارژ گردیده و از تولید توان این واحد که گرانترین واحد تولید توان است جلوگیری نموده است. میزان سطح انرژی باتری طبق رابطه ۱۸ باید در ابتدا و انتهای روز یکسان باشد که سطح انرژی ان در نمودار ۶ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۶ سطح انرژی باتری

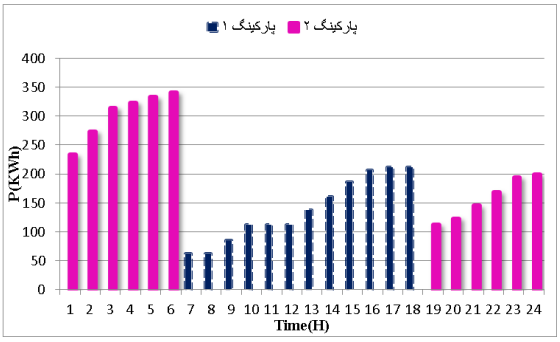
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

دو گروه خودرو الکتریکی سبک و سنگین در ریز شبکه حضور دارند که ساعات حضور ان‌ها متفاوت است. نحوه شارژ آن‌ها در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷ شارژ خودروهای پارکینگ الکتریکی ۱ و ۲

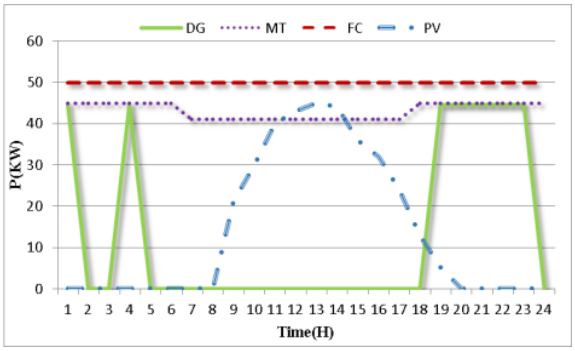
همانطور که در نمودار مشاهده می‌گردد خودورهای گروه اول در ساعاتی شارژ شده‌اند که مجموع ظرفیت واحدهای FC، MT و PV از بار الکتریکی ریز شبکه بیشتر بوده و عمل شارژ در ساعات ارزان تولید برق اتفاق افتاده است. اما عموما شارژ خوردوهای گروه دوم به واسطه تولید واحد DG تامین گردیده است زیرا در ساعات ۱۸ تا ۲۴ بار الکتریکی ریز شبکه افزایش پیدا کرده و در این ساعات واحد PV نیز تولید توان نداشته است بنابراین جهت شارژ خوردوهای الکتریکی واحد DG روشن شده و تولید توان داشته است. سطح انرژی پارکینگ ۱ و ۲ در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸ سطح انرژی خودروهای پارکینگ الکتریکی ۱ و ۲

۵-۲. مطالعه موردی دوم: برنامه‌ریزی بهینه یک ریزشبکه DC با در نظر گرفتن قابلیت G2V/V2G

در این مطالعه فرض می شود که خودروها قابلیت د شارژ دا شته با شند و در تامین بار ریز شبکه به واحدهای تولیدی کمک کنند. تولید توان واحدها در این مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است.



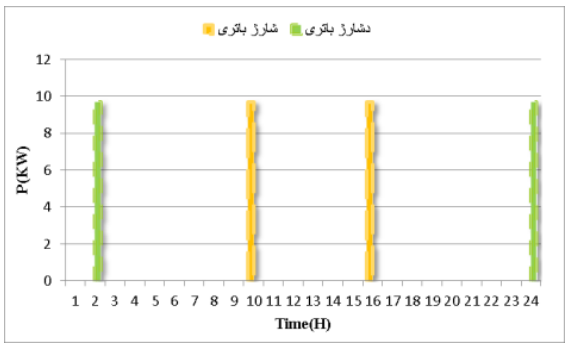
شکل ۹ میزان تولید واحدهای تولید

همانطور که مشاهده می‌شود در این مطالعه نیز همانند مطالعه موردی اول، FC با حداکثر ظرفیت در تمامی ساعات تولید داشته است. واحد MT در این مطالعه موردی در همه‌ی ساعات تولید توان داشته و عمدتا با حداکثر ظرفیت کار کرده است. اما در مطالع موردی اول مشاهده

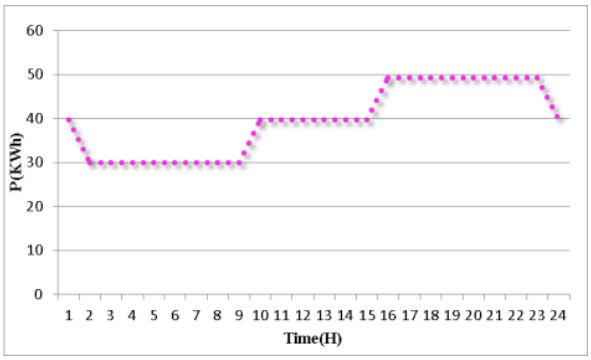
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

گردید که این واحد در ساعات ۱۱ و ۱۲ تولید توان ندا شته ا ست. واحد DG در این سناریو نیز همانند سناریو اول در برخی ساعات تولید داشته است با این تفاوت که در ساعات کمتری نسبت به سناریو اول تولید توان داشته است.

شارژ و دشارژ باتری در این سناریو در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در ساعات ۱۰ و ۱۱ شارژ و در ساعات ۲۴ و ۲ دشارژ شده است. باتری در این سناریو شارژ و دشارژ کمتری نسبت به سناریو اول انجام داده است که دلیل آن در بخش اخر توضیح داده شده است. شکل ۱۱ نیز سطح انرژی باتری را نشان داده است.

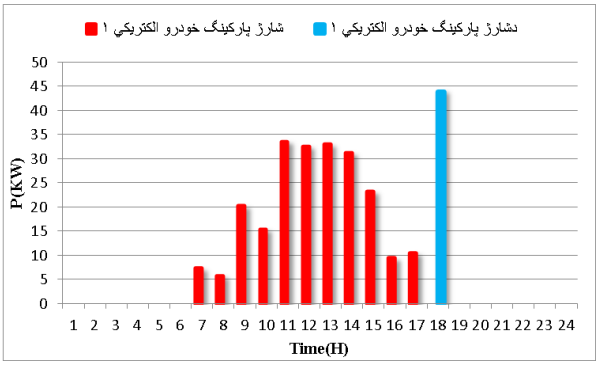


شکل ۱۰ میزان شارژ و دشارژ باتری



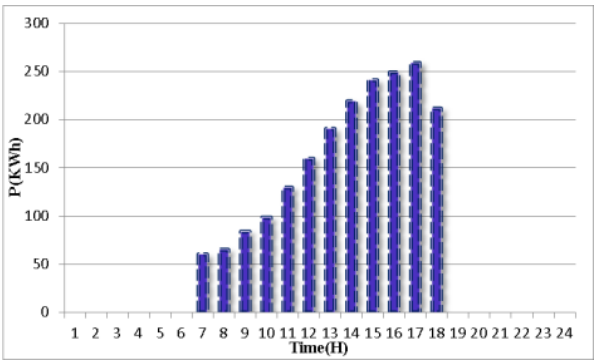
شکل ۱۱ سطح انرژی باتری

در شکل ۱۲ مقدار شارژ و دشارژ خودروهای پارکینگ اول و در شکل ۱۳ سطح انرژی آن‌ها نمایش داده شده است. این خودورها در ساعاتی که مقدار بار ریزشبکه از حداکثر ظرفیت واحدهای FC، MT و PV کمتر بوده شارژ شده‌اند. همانطور که در بخش قبل گفته شد سطح انرژی باتری خودروهای الکتریکی در زمان خروج از پارکینگ ۸۰ درصد حداکثر ظرفیت باتری می‌باشد اما در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد که در ساعت ۱۷ سطح انرژی باتری خودروها تقریبا ۱۰۰ درصد شده است و در ساعت ۱۸ دشارژ انجام شده است تا با سطح انرژی ۸۰ درصد از پارکینگ خارج شوند.



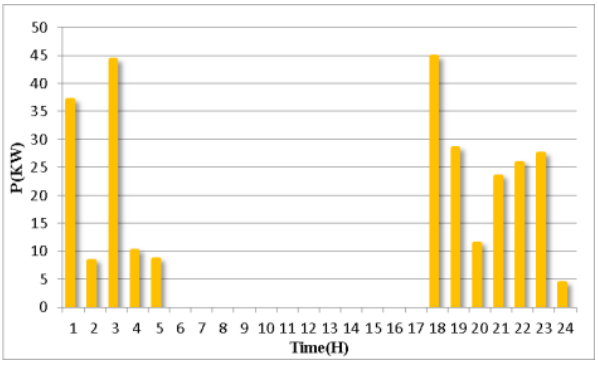
شکل ۱۲ شارژ و دشارژ پارکینگ خودرو الکتریکی۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

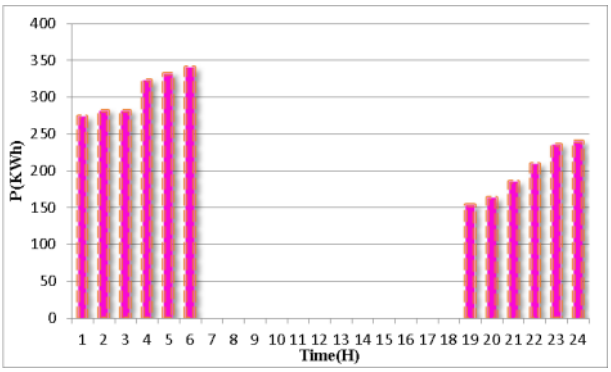


شکل ۱۳ سطح انرژی پارکینگ خودرو الکتریکی۱

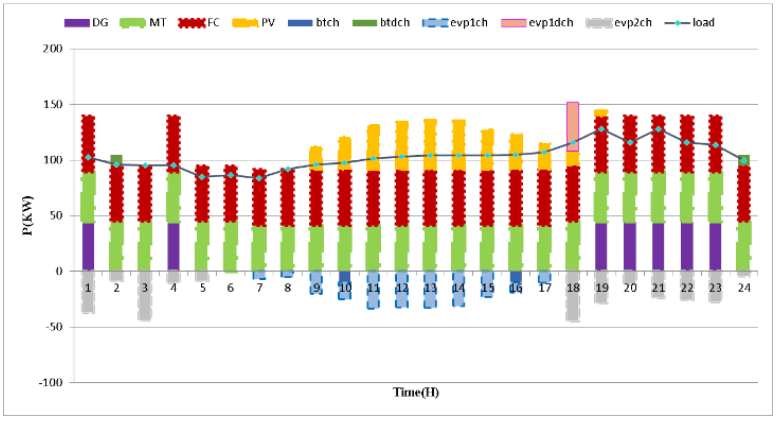
مقدار شارژ و دشارژ خودروهای پارکینگ ۲ در شکل ۱۴ و سطح انرژی آن‌ها نیز در شکل ۱۵ به تصویر کشیده شده است. شارژ خودروهای این پارکینگ تقریبا مشابه سناریو اول است با این تفاوت که در این سناریو در ساعت ۱۸ خودورها به مقدار قابل توجه‌ای شارژ انجام داده‌اند. در این سناریو خودروهای پارکینگ ۲ دشارژ نشده‌اند.



شکل ۱۴ شارژ و دشارژ پارکینگ خودرو الکتریکی۲



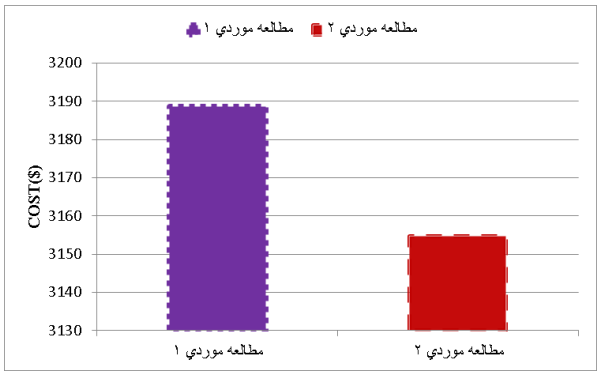
شکل ۱۵ سطح انرژی پارکینگ خودرو الکتریکی۲



شکل ۱۶ نحوه تأمین بار ریزشبکه

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

در شکل ۱۶ نحوه تأمین بار ریزشبکه نمایش داده شده است. در این سناریو مشاهده می‌گردد که در تمامی ساعات واحد MT تولید داشته است در صورتی که در سناریو اول در ساعات ۱۱ و ۱۲ این واحد خاموش بوده است. در واقع خودروهای پارکینگ ۱ انرژی ارزان‌تر واحد MT را در طول روز ذخیره نموده و در ساعت ۱۸ مقداری از آن را دشارژ کرده‌اند تا خودورهای پارکینگ ۲ در ساعت ۱۸ شارژ انجام دهند. دلیل این امر آن است که خودروهای پارکینگ ۲ در ساعات پرباری در پارکینگ حضور می‌یابند و جهت شارژ شدن آن‌ها باید واحد DG تولید توان نماید. بنابراین، با دشارژ خودروهای پارکینگ ۱ در ساعت ۱۸ و شارژ خودروهای پارکینگ ۲ در این ساعت موجب گردیده تولید واحد MT جایگزین واحد DG شود و در نتیجه کاهش هزینه‌های ریزشبکه در این سناریو را در پی داشته است.



شکل ۱۷ هزینه کلی تابع هدف در مطالعه ۱ و ۲

در شکل ۱۷ هزینه کلی تابع هدف در مطالعه ۱ و ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در مطالعه ۱ که قابلیت G2V/V2G در نظر گرفته نشده است، هزینه تابع هدف بسیار بیشتر از نتیجه مطالعه ۲ است. اختلاف ۳۳/۸۳۲ دلاری ما بین نتایج مطالعه ۱ و ۲ نشان از موثر بودن قابلیت G2V/V2G در بهینه‌سازی همزمان هزینه تولید و میزان انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای دارد.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی یک ریزشبکه DC متشکل از سیستم فتوولتائیک، میکروتوربین، دیزل ژنراتور، سلول سوختی، باتری و دو پارکینگ خودروی الکتریکی سبک و سنگین با هدف بهینه سازی هزینه و میزان انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای با استفاده از قابلیت G2V/V2G ارائه شده است. هنگامیکه پارکینگ خودروهای الکتریکی از قابلیت G2V/V2G بهره می‌گیرند هزینه کلی تابع هدف به دست آمده برابر با ۳۱۵۴/۷۳۲ دلار می‌باشد. این مقدار کمتر از زمانی است که خودروها از قابلیت G2V/V2G بهره‌مند نیستند که در این حالت هزینه کلی تابع هدف برابر با ۳۱۸۸/۵۶۴ دلار می‌باشد. حضور خودروهای الکتریکی با قابلیت G2V/V2G باعث گردیده که شارژ و دشارژ باتری در سناریو دوم نسبت به سناریو اول کاهش یابد و حضور این خودروها می‌تواند جایگزین باتری گردد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که قابلیت G2V/V2G اثر گذار است و می‌تواند به عنوان یک استراتژی جدید برای بهینه‌سازی همزمان هزینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای معرفی شود..

۷. فهرست علائم

fc	هزینه تأمین انرژی الکتریکی ($)
C	هزینه تولید واحد تولیدی ($)
CS	هزینه کلی روشن/خاموش کردن واحد تولیدی ($)
δD_g	هزینه روشن/خاموش کردن واحدهای تولید توان ($)
U	وضعیت باینری روشن/خاموش بودن هر واحد
N	تعداد دفعات
W	سطح انرژی (KWh)
CH	مقدار شارژ (KW)
DCH	مقدار دشارژ (KW)
SOC	مقدار ظرفیت (KWh)
علایم یونانی	

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

α,β,γ	ضرایب هزینه تولید واحدها
η	راندمان
بالانویس‌ها	
$EVPcharge$	شارژ پارکینگ خودرو الکتریکی
$Start$	شروع
$Stop$	توقف
Min	حداقل
Max	حداکثر
End	پایانی
زیرنویس‌ها	
$x_{start/stop}$	مجاز شروع و توقف هر واحد
$x_{max_start/stop}$	حداکثر مجاز شروع و توقف هر واحد
$bt-loss$	تلفات باتری
$Btch$	مقدار کل شارژ باتری
$Btcharge$	مقدار موثر شارژ باتری
$Btdch$	مقدار کل دشارژ باتری
$Btdischarge$	مقدار موثر دشارژ باتری
$EVPdischarge$	دشارژ پارکینگ خودرو الکتریکی

نویسنده مسئول متعهد می شود که در رابطه با انتشارمقاله تسلیمی تعارض منافعی وجود ندارد. علاوه بر این، نویسندگان به طور کامل از مسائل اخلاقی، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل در تهیه داده ها و یا ارسال و انتشار همزمان مقاله در دو یا چند نشریه آگاهی داشته و تماماً به رویت و آگاهی نویسندگان رسیده و رعایت شده است.

منابع

[۱] تراز نامهٔ انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و وزارت نیرو، ۱۳۹۵.

[۲] شکوهمند، احسان و قاسمی، احمد،برنامه ریزی بهینه ی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی خانگی با هدف افزایش انعطاف پذیری در یک ریزشبکه هوشمند: رویکرد تئوری بازی بیزین، The Second Conference on Applied Research in Electrical Engineering، ۱۴۰۰.

[۳] نژاد ملایری، وحید و جعفرزاده، جواد، نقش خودروهای الکتریکی در کاهش آلودگی هوا و توسعه محیط زیست هوشمند، اولین کنفرانس ملی شهر هوشمند، قم، ۱۳۹۵.

[4] Elsayed, A. T., Mohamed, A. A., & Mohammed, O. A. (2015). DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electric power systems research*, *119*, 407-417.

[5] Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R. (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy conversion and management*, *86*, 132-153.

[6] Al-Ismail, F. S. (2021). DC microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. *IEEe Access*, *9*, 36154-36172.

[7] Elwely Salem, C., Et-taleby, A., Chaibi, Y., Ayadi, N., Elkari, B., Benslimane, M., Chalh, Z., (2025). Exploring DC microgrid: Advanced applications and their control strategies. *Energy 360*, 3, 100019.

[8] Ullah, S., Haidar, A. M., Hoole, P., Zen, H., & Ahfock, T. (2020). The current state of Distributed Renewable Generation, challenges of interconnection and opportunities for energy conversion based DC microgrids. *Journal of Cleaner Production*, *273*, 122777.

[9] Mohamed, F. A., & Koivo, H. N. (2007). System modelling and online optimal management of microgrid with battery storage. *RE&PQJ*, *5*(1).

[10] Tenfen, D., & Finardi, E. C. (2015). A mixed integer linear programming model for the energy management problem of microgrids. *Electric Power Systems Research*, *122*, 19-28.

[11] Kumar, A., Maulik, A., Chinmaya, K. A. (2025). A decentralized energy management scheme for a DC microgrid with correlated uncertainties and integrated demand response. *Electric Power Systems Research*, 111093.

[12] Singh, A., Kumar, A., Chinmaya, K. A., Maulik, A., (2025). Optimal operation of an electricity-hydrogen DC microgrid with integrated demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, *39*, 101451.

[13] Mosa, M. A., & Ali, A. A. (2021). Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programing and a global optimization technique. *Electric Power Systems Research*, *192*, 106971..

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]

[14] Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, *42*, 569-596.
[15] Moghaddam, A. A., Seifi, A., Niknam, T., & Pahlavani, M. R. A. (2011). Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source. *energy*, *36*(11), 6490-6507.
[16] Rezvani, A., Gandomkar, M., Izadbakhsh, M., & Ahmadi, A. (2015). Environmental/economic scheduling of a micro-grid with renewable energy resources. *Journal of cleaner production*, *87*, 216-226.
[17] Chen, J., & Zhang, Y. (2019). A lagrange relaxation-based alternating iterative algorithm for non-convex combined heat and power dispatch problem. *Electric Power Systems Research*, *177*, 105982.
[18] HOMER Pro Version 3.7 User Manual URL:https://www.homerenergy.com/products online access 2018.
[19] Derakhshandeh, S. Y., Masoum, M. A., & Hamedani Golshan, M. E. (2015). Unit commitment in industrial microgrids with plug-in electric vehicles and photovoltaic generation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *25*(7), 1349-1365.
[20] Morales, J. M., & Perez-Ruiz, J. (2007). Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow. *IEEE Transactions on power systems*, *22*(4), 1594-1601.
[21] Arab republic of Egypt ministry of electricity and renewable energy, and Egyptian electricity holding company, “Annual Report 2015/2016,” 2016.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-21]