

مدیریت انرژی بهینه اتفاقی یک ریز شبکه DC دارای خودروهای الکتریکی با هدف کاهش همزمان هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌گی

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

چکیده

در این مقاله یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی یک ریز شبکه DC دارای خودروهای الکتریکی با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌گی گازهای گلخانه‌ای به صورت همزمان ارائه شده است. این ریز شبکه 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 ریز شبکه 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 آلاینده‌گی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از قابلیت G2V/V2G پارکینگ خودروهای الکتریکی موجود در این ریز شبکه استفاده شده است. مدل سازی ریز شبکه 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 آلاینده‌گی‌های گلخانه‌ای به صورت همزمان شود.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳ / ۱۲ / ۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴ / ۰۳ / ۱۸

کلمات کلیدی:

ریز شبکه DC
خودروی الکتریکی
مدیریت انرژی
گازهای گلخانه‌ای
G2V/V2G

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

۱ مقدمه

امروزه ریزش شبکه DC^۱ به عنوان یک مفهوم توسعه یافته در راستای نیل به اهدافی از قبیل کاهش هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و کاهش آلاینده‌های 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 ریز شبکه DC شده است (السايد^۴ و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۱۷-۴۰۷). ریز شبکه DC می‌تواند ژنراتورهای خود را با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌ها 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 توسعه 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: ۱۹-۱۰۰).

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

با توسعه به کارگیری تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های نو و افزایش رویکرد استفاده از ریز شبکه DC، بررسی معایب و مزایای روش‌های مختلف برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل ریز شبکه 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 ریز شبکه DC استفاده می‌شود (هوشایری^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰). اتصال گروهی از بارها و تولیدات پراکنده در قالب یک ریز شبکه می‌تواند هزینه تأمین انرژی الکتریکی را کاهش دهد (فیصل^{۱۱} و کوپو، ۲۰۰۷: ۷۴-۷۸). همچنین در بحث کمینه کردن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریز شبکه DC می‌تواند موثرتر ثمر واقع شود (تنفن^{۱۲} و فیناردی، ۲۰۱۵: ۲۸-۱۹). کمینه‌سازی هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌های 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 بالأخص 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 آلاینده‌های خودروهای مبتنی بر سوخت فسیلی امری مهم است. میزان تولید CO₂ 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: ۹۳-۱۱۱). استفاده از باتری جهت ذخیره انرژی و کاهش چالش‌های مرتبط با عدم قطعیت واحدهای تجدید

1 Direct Current

4 Elsayed

5 Eklas

4 Electric Vehicle Parking Lot

7 Elvely Salem

6 Grid-Vehicle-Grid

7 Al-Ismael

10 Hushairi

11 Faisal

12 Tenfen

13 Magdi

14 Magdi

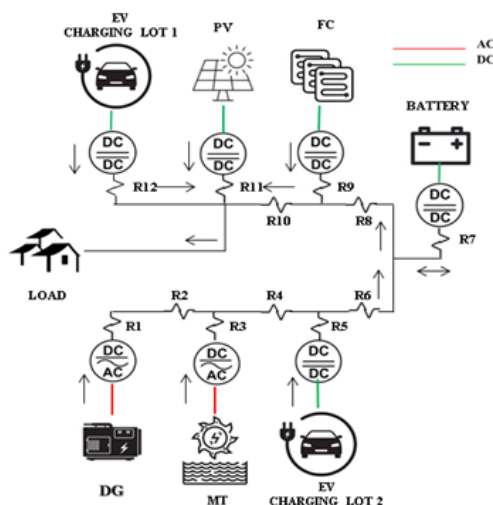
15 Kumar

پذیر در مطالعات پیشین بررسی شده است (سینگ و همکاران، ۲۰۲۵: ۱۰۴۵۱). ریز شبکه DC می تواند یک بستر بسیار مناسب برای توسعه استفاده از خودروهای الکتریکی و بهره برداری از ویژگی های آنها جهت کنترل هزینه و انتشار آلاینده ها باشد. بنابراین، هدف این مقاله آن است که با توجه به مزایای مختلفی که پیش تر در خصوص ریز شبکه DC با حضور خودروهای الکتریکی مطرح شد، یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی ریز شبکه DC با هدف بهینه سازی همزمان هزینه تولید و آلاینده ها ارائه دهد. نوآوری های این مقاله به شرح زیر است:

۱. برنامه ریزی بهینه جهت بهره برداری ریز شبکه DC با استفاده از قابلیت G2V/V2G خودروهای الکتریکی با هدف بهینه سازی هزینه و میزان انتشار آلاینده ها
۲. در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدید پذیر در برنامه ریزی بهینه ریز شبکه DC
۳. ارائه یک مدل دقیق از ریز شبکه DC با در نظر گرفتن تلفات خطوط در حضور باتری و خودروهای الکتریکی سبک و سنگین.

۲. مبانی نظری

نمای کلی ریز شبکه مدنظر در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. مطالعات بر روی یک ریز شبکه DC متشکل از میکروتوربین (MT)، دیزل ژنراتور (DG)، فیوسل (FC)، سیستم فتوولتائیک (PV)، باتری (BT) و همچنین دو پارکینگ خودروی الکتریکی (EV) است. کابل های این ریز شبکه با ۱/۵ برابر جریان نامی و با افت ولتاژ کمتر از ۵ درصد از هر واحد تولیدی به بار طراحی شده اند (الساید و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۷-۴۱۷). تنوع این ژنراتورهای تولید پراکنده باعث افزایش در دسترس بودن توان در غیاب یک یا چند منبع انرژی می شود (اسماعیل و صالح، ۲۰۲۱: ۳۶۱۵۴-۳۶۱۷۲).



شکل ۱ ریز شبکه DC مورد نظر

۳. روش تحقیق

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

معادلات مربوط به بهینه سازی هزینه، میزان انتشار آلایندهی و بهینه سازی هر دو مورد به صورت همزمان در این قسمت مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۱. بهینه سازی هزینه ها

در بحث بهینه سازی هزینه، هدف کمینه سازی هزینه تأمین انرژی الکتریکی در طول روز می باشد که در رابطه (۱) آورده شده است. این تابع هزینه شامل هزینه تولید در رابطه (۲) است (ذاکری و سیری، ۲۰۱۵: ۵۹۶-۵۹۹). هزینه کلی روشن/خاموش شدن واحدهای تولیدی در رابطه (۳) است (مقدم و همکاران، ۲۰۱۱: ۶۵۰۷-۶۴۹۰)

$$fC_g(h) = C_g(h) + CS_g(h) \quad (1)$$

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

$$CS_g(h) = \delta D_g |U_g(h) - U_g(h-1)| \quad (3)$$

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

۳-۲. بهینه سازی میزان انتشار گازهای گلخانه ای

در اینجا هدف کمینه سازی میزان انتشار آلایندهی گازهای گلخانه ای از تمامی واحدهای تولید است که در رابطه (۴) آورده شده است (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۲۶-۲۱۶)

$$fE_g(h) = fCO_2g(h) + fSO_g(h) + fNO_g(h) \quad (4)$$

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 آلایندهی منتشر شده از هر واحد تولیدی در ساعت h را نشان می دهد.

۳-۳. بهینه سازی هزینه تأمین انرژی الکتریکی و میزان انتشار آلایندهی گازهای گلخانه ای به صورت همزمان

به منظور کمینه سازی هزینه و میزان انتشار آلایندهی به صورت همزمان باید هر دو شاخص دارای یک مبنا یکسان باشند. به همین دلیل در این مقاله هزینه مقدار انتشار آلایندهی گازهای گلخانه ای CoE محاسبه 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 آلایندهی گاز گلخانه ای FC است.

$$CE_g(h) = fE_g(h) \times CoE_g(h) \quad (5)$$

$$cost_g(h) = CE_g(h) + fC_g(h) \quad (6)$$

۳-۴. قیود سیستم

معادله قید تعادل توان در رابطه (۷) آورده شده است 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 رابطه های (۸) و (۹) باشد، در حالی که بار FC با ۵٪ و ۱۰۰٪ 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^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

$$\sum P_g(h) - P_{loss}(h) = P_{load}(h) \quad (7)$$

$$(P_{DG_min} \leq P_{DG}(h) \leq P_{DG_max}) U_{DG} \quad (8)$$

$$(P_{MT_min} \leq P_{MT}(h) \leq P_{MT_max}) U_{MT} \quad (9)$$

$$(P_{FC_min} \leq P_{FC}(h) \leq P_{FC_max}) U_{FC} \quad (10)$$

$$N_{x_start/stop} \leq N_{x_max_start/stop} \quad (11)$$

یکی از عواملی که بر باتری اثر گذار است، تلفات مبدل DC است که از رابطه (۱۲) محاسبه می شود. 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 انرژی باتری است (مجدی و علی، ۲۰۲۱). در نظر داریم که راندمان شارژ و دشارژ باتری با هم برابر است. در نامساوی های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت های 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).

$$P_{bt-loss}(h) = 0.0015P_{bt}^2(h) + 0.01P_{bt}(h) + 0.06 \quad (۱۲)$$

$$P_{btcharge}(h) = P_{btch}(h) - P_{bt-loss}(h) \quad (۱۳)$$

$$P_{btdischarge}(h) = P_{btdch}(h) + P_{bt-loss}(h) \quad (۱۴)$$

$$W_{bt}(h) = W_{bt}(h-1) + P_{btcharge}(h) - P_{btdischarge}(h) \quad (۱۵)$$

$$(P_{btcharge-min} \leq P_{btcharge}(h) \leq P_{btcharge-max})U_{bt} \quad (۱۶)$$

$$(P_{btdischarge-min} \leq P_{btdischarge}(h) \leq P_{btdischarge-max})U_{bt} \quad (۱۷)$$

$$W_{bt-min} \leq W_{bt}(h) \leq W_{bt-max} \quad (۱۸)$$

$$W_{bt}(h=h_0) = W_{bt}(h=T) \quad (۱۹)$$

$$T \rightarrow 24h$$

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

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

۳-۵. مدل سازی عدم قطعیت به روش تخمین دو نقطه‌ای

در روش تخمین دو نقطه‌ای، برای مدل سازی N متغیر تصادفی تنها نیاز به حل سناریوهای $2 \times N$ می‌باشد. بنابراین، این رویکرد در مدل سازی 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 $(S_1, S_2, \dots, S_n, S_N)$ با مقدار میانگین μ و انحراف معیار σ است. Q به عنوان یک تابع چگالی احتمال نرمال به صورت $Q=F(S)$ معرفی می‌شود. در این روش ابتدا باید عدم تقارن متغیر تصادفی S_n که همان v_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^۱ و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۶۰۱-۱۵۹۴).

$$v_n = \frac{E(S_n - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (۲۱)$$

$$\varphi_{n,1} = \frac{v_n}{2} + \sqrt{N + \left(\sqrt{\frac{v_n}{2}}\right)^2} \quad (۲۲)$$

$$\varphi_{n,2} = \frac{v_n}{2} - \sqrt{N + \left(\sqrt{\frac{v_n}{2}}\right)^2} \quad (۲۳)$$

$$w_{n,1} = -\frac{1}{N} \frac{\varphi_{n,2}}{\varphi_{n,1} - \varphi_{n,2}} \quad (۲۴)$$

$$w_{n,2} = \frac{1}{N} \frac{\varphi_{n,1}}{\varphi_{n,1} - \varphi_{n,2}} \quad (۲۵)$$

$$E(Q) \cong E(Q) + \sum w_{n,a} Q_{n,a} \quad (۲۶)$$

۴. توصیف داده‌ها

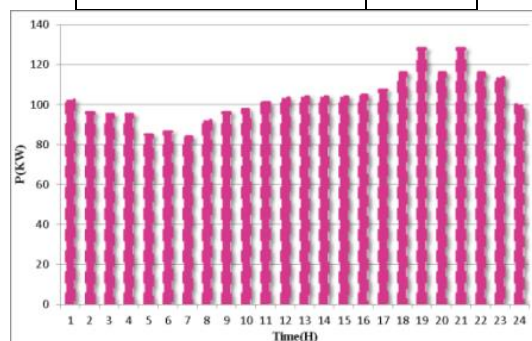
در این بخش مطالعات عددی انجام شده است تا کارایی استراتژی پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. جهت حل مدل پیشنهادی از نرم افزار بهینه‌سازی GAMS و با استفاده از حل گر CPLEX استفاده شده است.

ریزشبکه DC پیشنهادی در طی یک شبانه‌روز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این ریزشبکه شامل واحدهای تولید توان فتوولتائیک، میکروتوربین، دیزل ژنراتور و فیوسل است که از هر کدام یک واحد در ریزشبکه وجود دارد. همچنین یک باتری و دو پارکینگ خودروی الکتریکی نیز موجود می‌باشد (مطابق شکل ۱). 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

و علی، ۲۰۲۱). به منظور جلوگیری از عملکرد مخرب ژنراتورهای احتراق داخلی میکروتوربین و دیزل ژنراتور بین ۲۰٪ الی ۱۰۰٪ بار نامی و FC ما بین ۵٪ الی ۱۰۰٪ بار نامی فعالیت دارند (مقدم و همکاران، ۲۰۱۱: ۶۵۰۷-۶۴۹۰). در شکل ۲ پروفیل بار ریزش شبکه بدون در نظر گرفتن شارژ خودروها ترسیم شده است. در جدول ۱ با اندکی تغییر مقدار مقاومت‌های مسیر در نظر گرفته شده‌اند (وزارت نیرو و انرژی تجدید پذیر کشور مصر). ضرایب هزینه واحدهای تولید توان در جدول ۲ آورده شده است (السايد و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۱۷-۴۰۷). هزینه آلاینده‌های گلخانه‌ای در جدول ۳ آورده شده است (تراز نامه انرژی، ۱۳۹۵). داده‌های سیستم فتوولتائیک در جدول ۴، داده‌های تولیدی در جدول ۵ و داده‌های پارکینگ‌ها و باتری در جدول ۶ آورده شده است (مورالس و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۶۰۱-۱۵۹۴).

جدول ۱ مقدار مقاومت‌ها

$R1=R3=R9=R11=2 \times 4/825$	$R2=2 \times 19/3$
$R5=R7=R12=2 \times 7/745$	$R4=2 \times 18/8$
$R8=R10=2 \times 58$	$R6=2 \times 9/4$



شکل ۲ پروفیل بار

جدول ۲ ضرایب هزینه تولید

واحدها	α_g	β_g	δ_g
DG	۰/۰۰۰۳۷۳	۰/۰۷۳۱۴	۰/۶۴۳۲۵
MT	۰/۰۰۰۳۷۹	۰/۰۶۰۹۵	۰/۳۳۷۱۲
BT	۰/۰۰۰۱۰۹۵	۰/۰۷۳۷۳	۰/۰۰۴۳۸
FC	۰/۰۰۰۰۳۱۵	۰/۱۰۶۵۷۵	۰/۰۲۱
۱/۲EVP	۰/۰۰۰۱۰۹۵	۰/۰۷۳۷۳	۰/۰۰۴۳۸

جدول ۳ هزینه آلاینده‌ها به ازای هر کیلوگرم 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

۰/۰۵۵	۵	۱۹
۰	۰	۱ الی ۸
۰	۰	۲۰ الی ۲۴

جدول ۵ داده‌های واحدهای تولید

واحد	DG	MT	FC	PV	باتری
MIN(KW)	۹/۶	۹	۲/۵	۰	-۱۰
MAX(KW)	۴۸	۴۵	۵۰	۵۰	۱۰
δ_g (\$)	۰/۲۶۶۴	۰/۱۸۲۲۵	۰/۲۶۳۶۵	۰	۰
CO ₂ (KG)	۶۴۴/۴	۷۱۸/۲	۵۴۰		۵
SO (KG)	۰/۲۰۴۳	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۴	۰	۰/۰۰۰۲
NO (KG)	۹/۸۱۰	۰/۱۹۸	۰/۰۰۷۶۵	۰	۰/۰۰۱

جدول ۶ داده‌های پارکینگ‌ها و باتری

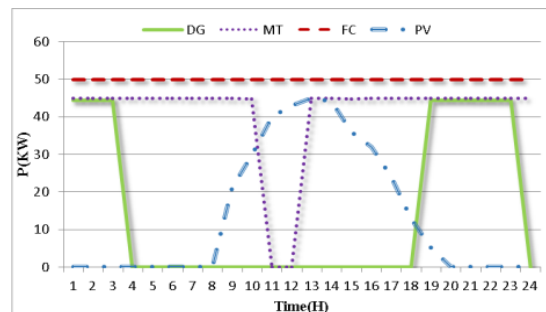
واحد	باتری	خودروهای پارکینگ ۱	خودروهای پارکینگ ۲
CH^{min} (KW)	۰	۰	۰
CH^{max} (KW)	۱۰	۴	۱۴
DCH^{min} (KW)	۰	۰	۰
DCH^{max} (KW)	۱۰	۴	۱۴
SOC^{min} (KWh)	۱۵	۲/۴	۸/۵
SOC^{max} (KWh)	۵۰	۲۴	۸۵
SOC^{start} (KWh)	۳۰	۴/۸	۱۷
SOC^{end} (KWh)	۳۰	۱۹/۲	۶۸

۵. نتایج اجرای مدل

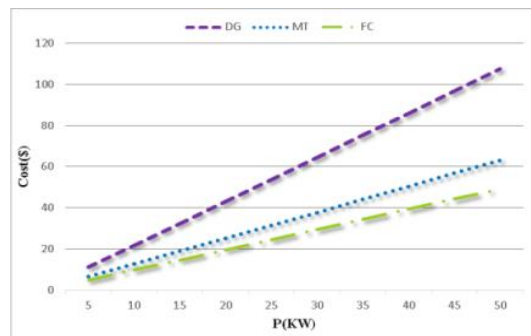
در این قسمت ابتدا ریز شبکه DC بدون استفاده از قابلیت G2V/V2G بررسی شده است و در حالت بعد با در نظر گرفتن ویژگی شارژر در خودرو الکتریکی مطالعات تکمیل شده است.

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

از آنجایی که اولویت تولید توان واحدها تابع هدف یعنی کاهش همزمان هزینه و آلاینده‌گی است، بنابراین نمودار هزینه واحدها در شکل ۳ نمایش داده شده است. طبق نمودار مشاهده می‌شود 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.

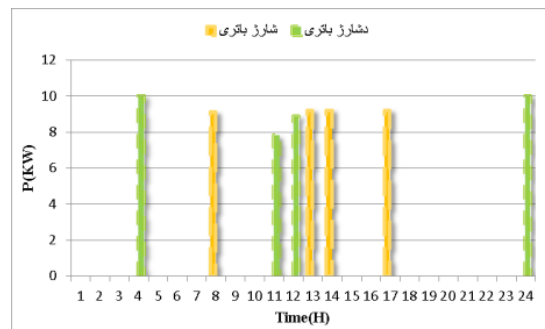


شکل ۳ هزینه تولید توان واحدها



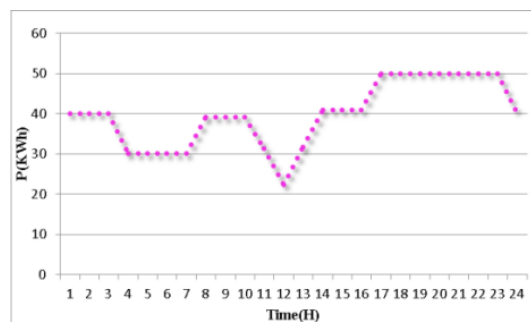
شکل ۴ میزان تولید واحدها

همانطور که در شکل ۴ مشخص است در تمام ساعات FC با حداکثر ظرفیت تولید توان داشته است زیرا این واحد تولید ارزانه‌تری نسبت به واحدهای MT و DG دارد. اولویت دوم تولید توان در جهت تأمین بار ریز شبکه بر عهده MT بوده است زیرا این واحد نیز به نسبت DG برق ارزانه‌تری تولید می‌کند بنابراین در تمامی ساعات بغیر از ساعات ۱۱ و ۱۲ تولید توان انجام داده است. در ساعات ابتدا و انتهای روز (۱-۳ 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.



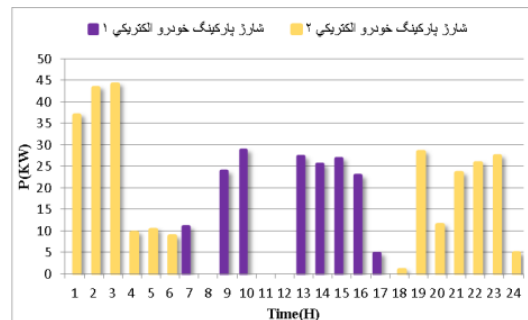
شکل ۵ میزان شارژ و دشارژ باتری

نحوه عملکرد باتری در شکل ۵ نشان داده شده است. در ساعاتی که مقدار ظرفیت تولید واحدهای ارزان‌تر بیشتر از بار ریز شبکه بوده، باتری شارژ شده است و در ساعاتی که مجموع ظرفیت واحدهای ارزان کمتر از بار ریز شبکه 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 ریز شبکه از مجموع ظرفیت واحدهای FC و MT بیشتر و در این ساعت تولید PV نیز صفر بوده است بنابراین برای تأمین بار ریز شبکه باید واحد DG تولید توان انجام می‌داد اما در این ساعت باتری دشارژ 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 آن در نمودار ۶ به نمایش گذاشته شده است.



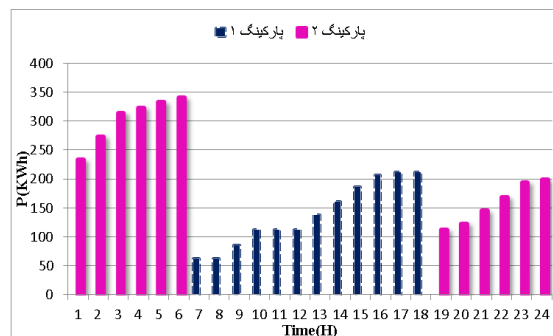
شکل ۶ سطح انرژی باتری

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



شکل ۷ شارژ خودروهای پارکینگ الکتریکی ۱ و ۲

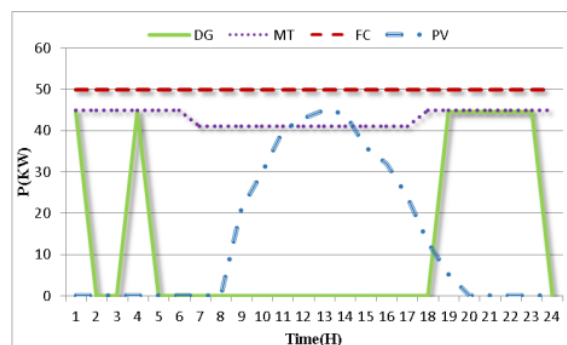
همانطور که در نمودار مشاهده می‌گردد خودروهای گروه اول در ساعاتی شارژ شده‌اند که مجموع ظرفیت واحدهای MT، FC و PV از بار الکتریکی ریز شبکه بیشتر بوده و عمل شارژ در ساعات ارزان تولید برق اتفاق افتاده است. اما عموماً شارژ خودروهای گروه دوم به واسطه تولید واحد DG تامین گردیده است زیرا در ساعات ۱۸ تا ۲۴ بار الکتریکی ریز شبکه افزایش پیدا کرده و در این ساعات واحد PV نیز تولید توان نداشته است بنابراین جهت شارژ خودروهای 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

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

در این مطالعه فرض می‌شود که خودروها قابلیت شارژ داشته باشند و در تامین بار ریز شبکه به واحدهای تولیدی کمک کنند. تولید توان واحدها در این مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است.

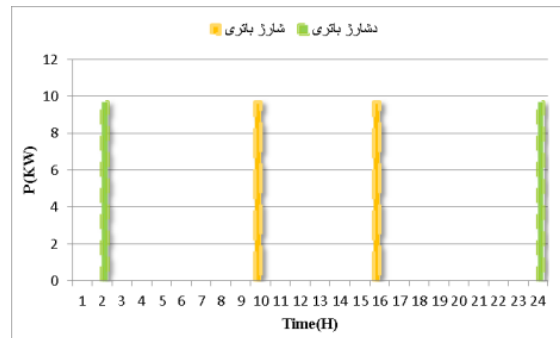


شکل ۹ میزان تولید واحدهای تولید

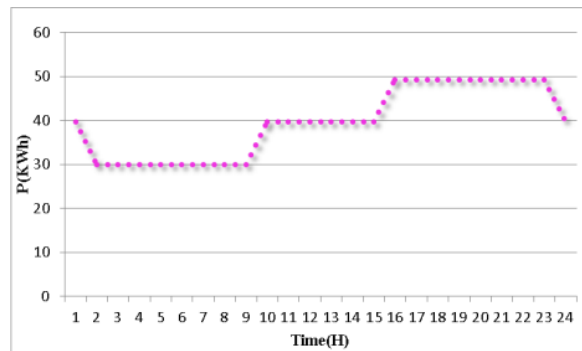
همانطور که مشاهده می‌شود در این مطالعه نیز همانند مطالعه موردی اول، FC با حداکثر ظرفیت در تمامی ساعات تولید داشته است. واحد MT در این مطالعه موردی در تمامی ساعات تولید توان داشته و عمدتاً با حداکثر ظرفیت کار کرده است. اما در مطالع موردی اول مشاهده

گردید که این واحد در ساعات ۱۱ و ۱۲ تولید نتوان داشته است. 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 آخر توضیح داده شده است. شکل ۱۱ نیز سطح انرژی باتری را نشان داده است.

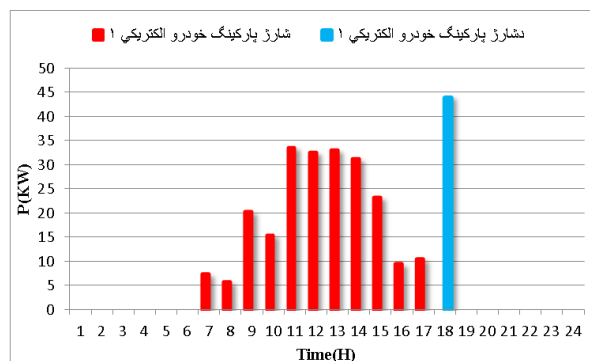


شکل ۱۰ میزان شارژ و دشارژ باتری

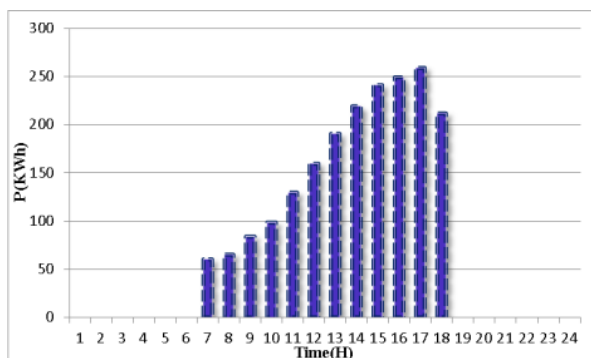


شکل ۱۱ سطح انرژی باتری

در شکل ۱۲ مقدار شارژ و دشارژ خودروهای پارکینگ اول و در شکل ۱۳ سطح انرژی آن‌ها نمایش داده شده است. این خودروها در ساعاتی که مقدار بار ریزش شبکه 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 تقریباً ۱۰۰ درصد شده است و در ساعت ۱۸ دشارژ انجام شده است تا با سطح انرژی ۸۰ درصد از پارکینگ خارج شوند.

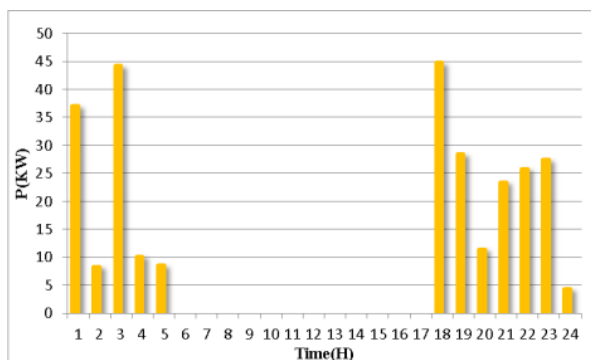


شکل ۱۲ شارژ و دشارژ پارکینگ خودرو الکتریکی ۱

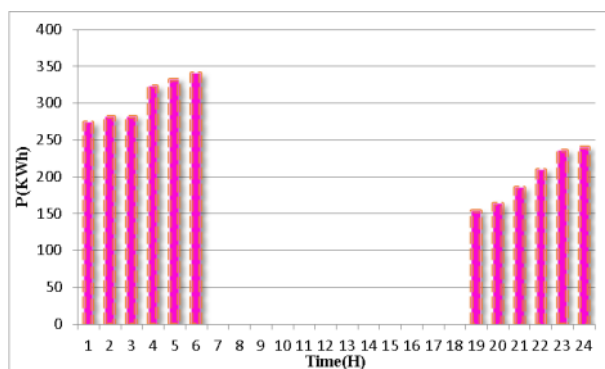


شکل ۱۳ سطح انرژی پارکینگ خودرو الکتریکی ۱

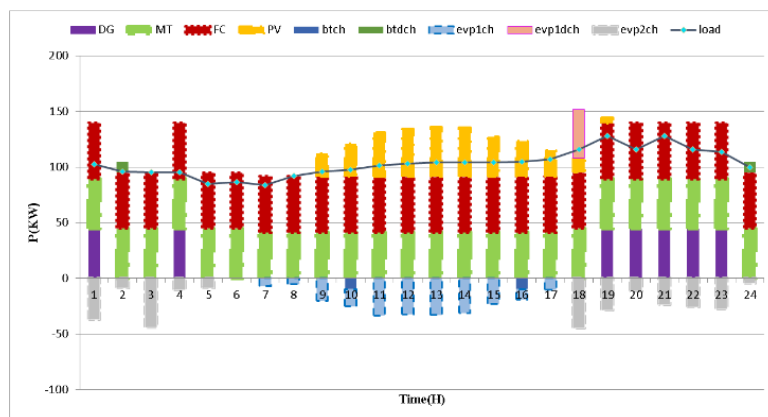
مقدار شارژ و دشارژ خودروهای پارکینگ ۲ در شکل ۱۴ و سطح انرژی آن‌ها نیز در شکل ۱۵ به تصویر کشیده شده است. شارژ خودروهای این پارکینگ تقریباً مشابه سناریو اول است با این تفاوت که در این سناریو در ساعت ۱۸ خودروها به مقدار قابل توجهی شارژ انجام داده‌اند. در این سناریو خودروهای پارکینگ ۲ دشارژ نشده‌اند.



شکل ۱۴ شارژ و دشارژ پارکینگ خودرو الکتریکی ۲

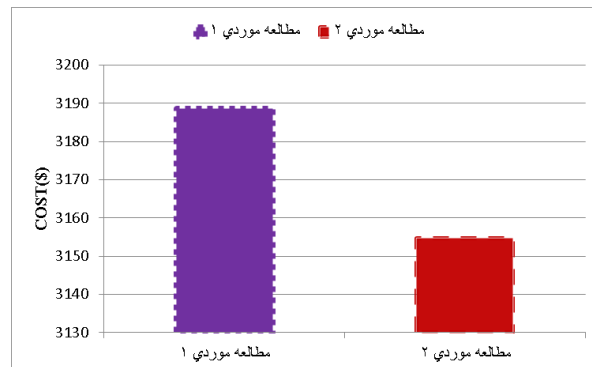


شکل ۱۵ سطح انرژی پارکینگ خودرو الکتریکی ۲



شکل ۱۶ نحوه تأمین بار ریزشیکه

در شکل ۱۶ نحوه تأمین بار ریزشکه 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 خودروهای 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 ریزشکه 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 آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای دارد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله یک استراتژی جدید جهت مدیریت انرژی یک ریزشکه DC متشکل از سیستم فتوولتائیک، میکروتوربین، دیزل ژنراتور، سلول سوختی، باتری و دو پارکینگ خودروی الکتریکی سبک و سنگین با هدف بهینه‌سازی هزینه و میزان انتشار آلاینده‌های 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

f_c	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 بایتری روشن/خاموش بودن هر واحد
N	تعداد دفعات
W	سطح انرژی (KWh)
CH	مقدار شارژ (KW)
DCH	مقدار دشارژ (KW)
SOC	مقدار ظرفیت (KWh)

علائم یونانی

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 انتشار مقاله 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 نامه انرژی، دفتر برنامه ریزی 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-Ismael, 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..

- [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](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.