

برنامه‌ریزی تصادفی شارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی در پارکینگ خودروهای برقی با در نظر گرفتن قابلیت تأمین بار شبکه

علی بدری، کاظم حسین پور لنبر

دانشکده برق و کامپیوتر

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

تهران، ایران

۱. مقدمه

در یکصد سال گذشته، انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای توسط کارخانه‌ها و خودروهای درونسوز، باعث تغییرات بی‌سابقه‌ای در آب و هوای کره زمین شده است. دولت‌ها و طرفداران حفاظت محیط زیست از دهه‌های گذشته تلاش‌های گسترده‌ای برای کاهش آلاینده‌های جوی شروع کرده‌اند. قسمتی از این تلاش‌ها در راستای کاهش میزان آلاینده‌های زیست-محیطی، کاهش آلاینده‌های صوتی ناشی از موتور این اتوموبیل‌ها و هزینه پایین‌تر برق مصرفی خودروی الکتریکی نسبت به سوخت مصرفی خودروهای معمولی به ازای مسافت واحد مزید بر عتد شده است تا خودروهای برقی جایگزین مناسبی برای خودروهای درونسوز باشند [۱-۳].

در این مقاله منظور از اصطلاح خودروهای برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه (PHEV)^۱ خودروهایی هستند که دارای قابلیت انتقال دوجته توان می‌باشند. اگر تعداد قابل توجهی از خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه به صورت هماهنگ تحت مدیریت و کنترل یک نهاد گردهم آورنده همانند پارکینگ خودروهای برقی به شبکه متصل شوند، می‌توانند به عنوان یک نیروگاه مجازی (VPP)^۲ کوچک با سرعت راه‌اندازی بسیار بالا و بدون هزینه راه‌اندازی رفتار کنند. همچنین این نوع خودروها هنگام شارژ باتریشان همانند یک بار مصرفی عمل کرده و از شبکه انرژی دریافت می‌کنند [۴].^۳(G2V)

چکیده — امروزه با جایگزینی خودروهای درونسوز با خودروهای برقی و اتصال آنها به شبکه قدرت، لزوم برنامه‌ریزی مناسب برای استفاده بهینه از این منابع ذخیره‌ساز انرژی بیش از پیش احساس می‌شود. بار ناشی از شارژ طولانی این خودروها و زمان طولانی شارژ آنها می‌تواند موجب افزایش بار شبکه توزیع و به خطر افتادن امنیت سیستم گردد. لذا علی‌رغم فواید متعدد نگرانی‌هایی در مورد شارژ گسترده و بدون برنامه این خودروها در شبکه توزیع وجود دارد. در این مقاله با برنامه‌ریزی تصادفی شارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی در پارکینگ خودروهای برقی و با در نظر گرفتن تعرفه‌های متغیر برق، زمان و سطح شارژ باتری خودروها کنترل می‌گردد. هدف از این برنامه‌ریزی تصادفی کمینه‌سازی هزینه‌های شارژ خودروهای برقی از دیدگاه صاحبان پارکینگ‌های خودروهای برقی می‌باشد. همچنین در این مقاله پارکینگ خودروهای برقی دارای قابلیت دشارژ باتری خودروها در بازه‌های زمانی تعرفه بالا جهت تأمین قسمتی از دیمانند شبکه نیز می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش هزینه، به دلیل مشابهت منحنی بار و تعرفه‌های متغیر بازار برق، از پیک بار مصرفی نیز به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی — خودروی الکتریکی هیبریدی (PHEV)، قابلیت تأمین بار شبکه (V2G)، پیک بار شبکه، تعرفه‌های متغیر بازار برق.

¹ Plug-In Hybrid Electric Vehicle

² Virtual Power Plant

³ Grid-to-Vehicle

اطلاعات تصادفی برای PHEV های این پارکینگ با استفاده از توابع احتمالاتی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳ فرمول‌بندی ریاضی مسئله بهینه‌سازی برای پارکینگ خودروهای الکتریکی ارائه شده و در بخش ۴ نتایج سناریوهای مختلف بر روی مدل، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. سرانجام، بخش ۵ به نتیجه‌گیری از این مقاله می‌پردازد.

۲. مدل‌سازی PHEV ها در پارکینگ‌های

خودروهای برقی

در این بخش نحوه مدل‌سازی PHEV ها در پارکینگ خودروهای برقی و نیز تولید اطلاعات تصادفی مربوط به تمام PHEV ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی PHEV ها در پارکینگ خودروهای برقی بر اساس مشخصات آنها صورت می‌گیرد. این مشخصات را می‌توان در دو دسته تقسیم‌بندی نمود:

- مشخصات وابسته به نوع PHEV ها
- مشخصات وابسته به زمان شارژ PHEV ها

۲.۱. مشخصات وابسته به نوع PHEV ها

در PHEV ها یک موتور درونسوز، با موتور الکتریکی و یک باتری همراه شده است. با توجه به این که در این مقاله هدف کنترل شارژ باتری خودرو است، لذا در ادامه به مشخصات شارژ باتری خودرو به صورت کلی اشاره می‌شود.

ظرفیت باتری یکی از عوامل مهم در تعیین مسافتی است که خودرو می‌تواند در حالت الکتریکی طی کند و اصطلاحاً به آن AER^۲ می‌گویند. این مقدار وابسته به شرکت سازنده خودرو می‌باشد. در جدول ۱ ظرفیت باتری و AER تعدادی از PHEV های ساخته‌شده توسط شرکت‌های مختلف نشان داده شده است [۱۱].

تحقیقات نشان می‌دهد که صاحبان خودروهای برقی بیشتر تمایل دارند تا از خودروهای با اندازه متوسط و کوچک استفاده کنند. به عنوان نمونه خودروی Chevrolet Volt به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین PHEV ها در سال ۲۰۱۱ نسبت به سایرین ترجیح داده شده است [۱۲].

فواید و موانع حضور گسترده PHEV ها در شبکه در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مراجع [۷-۵] مسأله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن قابلیت اتصال خودروهای برقی به شبکه با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی شده است. در این مقالات هیچ توجهی به مدت زمان اتصال خودروها به شبکه نشده است. همچنین در این مقالات نهاد گردهم‌آورنده خود را ملزم به رعایت مینیمم مقدار شارژ باتری خودروها هنگام انفصال از شبکه نکرده است. در [۸] تأثیر PHEV بر روی منحنی بار شبکه، ظرفیت تولید، هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی شده است. همچنین در [۹-۱۰] به ترتیب تأثیر حضور PHEV ها بر روی کمینه کردن تلفات شبکه توزیع از دیدگاه اپراتور شبکه توزیع و نیز اتصال خودروهای برقی به شبکه به منظور تأمین رزرو و نیز رگولاسیون فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است.

در بسیاری از مقالاتی که به برنامه‌ریزی شارژ خودروهای الکتریکی پرداخته‌اند، بهینه‌سازی از دیدگاه اپراتور شبکه صورت گرفته است؛ در حالی که می‌توان با بهینه‌سازی شارژ خودروها از دیدگاه پارکینگ‌های خودروهای برقی علاوه بر تأمین بیشتر مصالح مصرف‌کننده و کاهش هزینه‌های پرداختی شارژ خودروها، در جهت بهبود مشخصات شبکه توزیع نیز حرکت نمود. جهت نیل به این هدف بایستی تعرفه‌های برق که تابعی از نرخ‌های متغیر لحظه‌ای بازار برق هستند، به گونه‌ای طراحی شوند که پارکینگ خودروهای برقی الگوی مصرف خود را در جهت مسطح شدن منحنی بار در ساعات پیک تغییر دهد.

در این مقاله با استفاده از روش مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی، شارژ باتری PHEV ها در یک پارکینگ خودروهای برقی با هدف کمینه‌سازی هزینه پارکینگ صورت می‌گیرد. این برنامه توسط کنترل‌کننده‌ای در پارکینگ صورت می‌گیرد و قابلیت V2G^۱ نیز برای این پارکینگ در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر عواملی مهمی از جمله زمان خروج PHEV از پارکینگ، مسافت طی شده روزانه، زمان بازگشت PHEV به پارکینگ و نیز شرایط ترافیک و عادت‌های رانندگی که بایستی در برنامه‌ریزی شارژ PHEV ها مورد توجه قرار گیرند با استفاده از توابع تصادفی احتمالاتی مدل‌سازی شده است. سرانجام تأثیر حضور پارکینگ خودروهای برقی با و بدون کنترل شارژ بر هزینه‌ها و پیک منحنی بار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ روش مدل‌سازی پارکینگ خودروهای برقی با توجه به مشخصات آن شرح داده می‌شود. همچنین در این بخش تولید

²All-electric range

¹ Vehicle-to-Grid

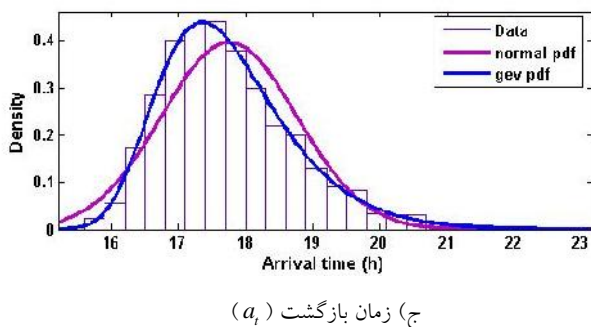
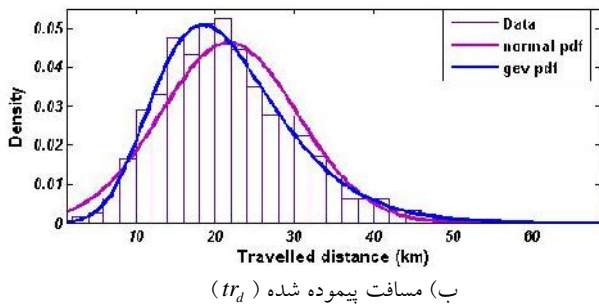
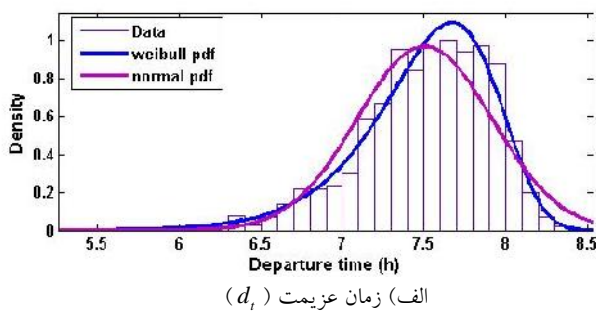
انواع توابع توزیع احتمال مورد آزمایش قرار گرفته و در پایان بهترین تابع انتخاب می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل ۱- الف ملاحظه می‌شود تابع توزیع احتمال غیرگوسین Weibull به عنوان مناسب‌ترین تابع برای مدل‌سازی پارامتر تصادفی زمان عزیمت PHEV ها (d_i) از پارکینگ در نظر گرفته شده است. از لحاظ ریاضی این تابع به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{d_i}(t) = \frac{s}{r} \left(\frac{t}{r}\right)^{(s-1)} e^{-\left(\frac{t}{r}\right)^s} \quad t > 0 \quad (1)$$

برای مدل‌سازی پارامتر مسافت طی شده در طول روز (tr_d) تابع توزیع احتمال غیرگوسین 4 Gev مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱- ب). این تابع به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{tr_d}(t) = \frac{1}{\dagger_{tr_d}} (1 + k_{tr_d} \frac{(d - tr_d)}{\dagger_{tr_d}})^{-(1 + \frac{1}{k_{tr_d}})} e^{-\left(1 + k_{tr_d} \frac{(d - tr_d)}{\dagger_{tr_d}}\right)^{\frac{1}{k_{tr_d}}}} \quad (2)$$



شکل ۱: توابع توزیع احتمال غیرگوسین اطلاعات تصادفی PHEV ها

جدول ۱. ظرفیت باتری و AER برای PHEV های مختلف

نام ماشین	ظرفیت باتری (KWh)	AER(mile)
BYD FDM	۱۶	۴۰
Fisker Karma	۲۲	۵۰
Ford C-Max	۹	۲۸
Ford Escape	۱۰	۳۰
General motors Chevrolet Volt	۱۶	۴۰

نرخ شارژ و دشارژ باتری سرعت پر و خالی شدن باتری خودرو را نشان می‌دهد. هنگامی که کنترلر وظیفه شارژ و دشارژ خودرو را انجام می‌دهد، نرخ شارژ ثابت نیست و باتری می‌تواند در ساعات مختلف در سطوح مختلفی شارژ شود، اما با توجه به مشخصات باتری و نیز شبکه تغذیه‌کننده این مقدار نمی‌تواند از مقداری بیشتر شود. در این مقاله همانند [۱۳] حداکثر نرخ شارژ و دشارژ باتری خودرو برابر با ۰/۱ ظرفیت نامی باتری در نظر گرفته شده است.

۲.۲. مشخصات وابسته به زمان شارژ PHEV ها

مدت زمانی که خودرو برای شارژ به شبکه وصل می‌شود به پارامترهای گوناگونی از جمله زمان آغاز و پایان شارژ و نیز سطح اولیه شارژ خودرو (SOC)^۱ بستگی دارد. همچنین مدت زمان شارژ تابعی از نرخ شارژ می‌باشد.

مطالعات مختلفی در مورد زمان شروع و پایان شارژ خودروها انجام گرفته است. در این مقاله ابتدا پارامترهای مورد نیاز از تعداد زیادی از خودروها جمع‌آوری شده و سپس با کمک جعبه‌ابزار statistics در نرم‌افزار متلب، تابع توزیع احتمال^۲ مناسب که بتواند تمامی داده‌ها را دربرگیرد، انتخاب شده است [۱۴].

در اکثر مقالات گذشته از توابع گوسین (همانند تابع توزیع احتمال نرمال) برای مدل‌سازی پارامترهای تصادفی PHEV ها استفاده شده است؛ با این وجود به دلیل عدم مطابقت این توابع با تمامی داده‌های موجود، نتایج بدست آمده چندان دقیق نمی‌باشند (شکل ۱). در این مقاله برای رفع این مشکل از توابع توزیع احتمال غیرگوسین^۳ که همپوشانی بیشتری با داده‌های تولید شده دارند استفاده شده است. برای این منظور با کمک نرم‌افزار متلب

¹ State Of Charge (SOC)

² probability distribution function (pdf)

³ non-Gaussian

⁴ Generalized expected value

جدول ۲: اطلاعات توابع توزیع احتمال پارامترهای PHEV ها

داده ها	تابع توزیع احتمال نرمال	تابع توزیع پیشنهادی
d_t	$\sim_{Nd_t} = 7.48436$	$r = 7.67454$
	$\dagger_{Nd_t} = 0.43178$	$s = 21.3812$
tr_d	$\sim_{Nd_t} = 21.4150$	$k_{tr_d} = -0.052368$
	$\dagger_{Nd_t} = 8.58711$	$\sim_{tr_d} = 17.6568$
		$\dagger_{Ntr_d} = 7.1222$
a_t	$\sim_{Nd_t} = 17.7170$	$k_{tr_d} = -0.060798$
	$\dagger_{Nd_t} = 1.01385$	$\sim_{tr_d} = 17.2700$
		$\dagger_{Ntr_d} = 0.84832$

پارکینگ صورت می‌گیرد. تابع هدف این برنامه بهینه‌سازی به صورت زیر است:

$$\text{Minimize: } \sum_{N_{PHEV}} \sum_{a_t} (P^p(t).price_G(t) - P^s(t).contract_price_G(t)) \quad (6)$$

در رابطه فوق N_{PHEV} نشان‌دهنده تعداد PHEV ها در پارکینگ، a_t و d_t به ترتیب بیانگر زمان‌های ورود و خروج PHEV ها در پارکینگ می‌باشد. همچنین $price_G(t)$ قیمت فروش برق به پارکینگ در لحظه t ، $contract_price_G(t)$ قیمت خرید انرژی از پارکینگ از جانب شبکه، $P^p(t)$ توان حقیقی که پارکینگ جهت شارژ خوروهایش از شبکه دریافت می‌کند و نیز $P^s(t)$ توان حقیقی را که پارکینگ به شبکه می‌فروشد را نشان می‌دهند.

کنترل در کمینه کردن تابع هدف (۶) قیود زیر را رعایت می‌نماید:

$$P^p(t) = \frac{ch(t)}{y} \quad \forall PHEV \quad \forall t \quad (7)$$

$$P^s(t) = dch(t)y \quad \forall PHEV \quad \forall t \quad (8)$$

$$\sum_{a_t} (ch(t) - dch(t)) + SOC_0 = Cap_{bat} \quad \forall PHEV \quad (9)$$

$$E_t = E_{t-1} + ch(t) - dch(t) \quad \forall t \quad (10)$$

$$0 \leq ch(t) \leq ch_{max} \quad \forall t \quad (11)$$

$$0 \leq dch(t) \leq dch_{max} \quad \forall t \quad (12)$$

$$0 \leq E(t) \leq E_{max} \quad \forall t \quad (13)$$

همچنین تابع توزیع احتمال Gev مناسب‌ترین گزینه برای مدل‌سازی زمان بازگشت PHEV ها به پارکینگ (a_t) در نظر گرفته شده است، این تابع به صورت زیر می‌باشد (شکل ۱-ج):

$$f_{a_t}(t) = \frac{1}{\dagger_{a_t}} (1 + k_{a_t} \frac{(d - \sim_{a_t})}{\dagger_{a_t}})^{-(1 + \frac{1}{k_{a_t}})} e^{-(1 + k_{a_t} \frac{(d - \sim_{a_t})}{\dagger_{a_t}})^{\frac{1}{k_{a_t}}}} \quad (3)$$

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به منظور نشان دادن کارایی توابع توزیع احتمال غیرگوسین فوق‌الذکر، این توابع با تابع توزیع نرمال گوسین مقایسه شده است. چنانچه از این شکل‌ها مشهود است، این توابع دارای دقت همپوشانی بیشتری در مقایسه با تابع توزیع احتمال نرمال می‌باشند. بعلاوه، اطلاعات مربوط به تمامی این توابع در جدول ۲ آورده شده است.

انرژی مورد نیاز برای شارژ کامل باتری خودرو، ch ، برابر است با تفاضل ظرفیت باتری، Cap_{bat} ، و مقدار انرژی باقیمانده در باتری، SOC_0 ، هنگامی که از آخرین سفر روزانه خود برمی‌گردند. این عبارت را می‌توان در قالب معادله زیر بیان نمود:

$$ch = Cap_{bat} - SOC_0 \quad (4)$$

شارژ اولیه باتری هنگامی که خودرو در آغاز بازه زمانی شارژ می‌شود، به عوامل مختلفی از جمله مسافت طی شده توسط خودرو در طول روز، ظرفیت باتری خودرو، عادت‌های رانندگی و نیز شرایط ترافیک بستگی دارد. برای تعیین مقدار شارژ اولیه هر خودرو هنگامی که برای شارژ به پارکینگ می‌رود از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$SOC_0 = 100 - \frac{tr_d}{C_{eff} \times Cap_{bat}} \times 100 \quad (5)$$

در معادله ۵، C_{eff} ضریب بهره خودرو می‌باشد که مقدار آن به عادت‌های رانندگی و نیز شرایط ترافیکی بستگی دارد. همچنین Cap_{bat} بیانگر ظرفیت باتری و نیز tr_d بیانگر مسافت طی شده توسط خودرو می‌باشند.

۳. فرمول‌بندی مسئله

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره گردید، در این مقاله برنامه‌ریزی شارژ PHEV ها در پارکینگ خودروهای برقی با هدف کمینه‌سازی هزینه پرداختی پارکینگ صورت می‌گیرد. این برنامه توسط کنترل‌کننده‌ای در پارکینگ و با حل یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف مینیمم کردن هزینه

مشخصات PHEV های پارکینگ در جدول (۳) آمده است. همچنین در این مقاله فرض شده است که تعرفه برق به صورت زمان استفاده (TOU)^۱ می‌باشد. تعرفه‌های استفاده شده برای این نوع قیمت‌دهی (جدول (۴))، مربوط به بازار برق نوردپول می‌باشد [۱۶]. در بازار نوردپول هر روز بر اساس بار شبکه به سه بازه زمانی کم‌باری، میان‌باری و پرباری تقسیم شده است. ساعات کم‌باری از (۱ تا ۷)، ساعات میان‌باری (۸ تا ۱۰، ۱۴ تا ۱۶ و ۲۲ تا ۲۴) و ساعات پرباری (۱۱ تا ۱۳ و ۱۷ تا ۲۱) است.

۴.۱. تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از برنامه‌ریزی شارژ پارکینگ خودروهای برقی در سناریوهایی که پیشتر ذکر گردید، ارائه شده است.

• شارژ بدون کنترل PHEV ها و بدون قابلیت V2G

در این حالت هیچ کنترلی روی شارژ خودروها، در پارکینگ وجود ندارد. لذا پس از بازگشت PHEV ها به پارکینگ در زمان a_i ، باتری خودرو شروع به شارژ شدن می‌کند. با توجه به مقدار شارژ اولیه خودرو (SOC_0) خودرو و نیز نرخ شارژ و دشارژ برای خودرو بایستی در پایان بازه زمانی مجاز $[a_i, d_i]$ شارژ باتری خودرو کامل گردد (معادله ۹). این بازه شارژ، منطبق بر پیک بار شبکه می‌باشد؛ لذا هم هزینه پارکینگ افزایش خواهد یافت و هم اینکه بر اثر افزایش پیک بار شبکه، امنیت آن نیز به خطر خواهد افتاد.

جدول ۳: مشخصات PHEV ها در پارکینگ.

تعداد کل PHEV ها در پارکینگ	۱۰۰۰
ظرفیت باتری PHEV ها	۳۲ KWh
نرخ شیب شارژ و دشارژ باتری PHEV ها	۳/۲ KWh/h
بازده مبدل باتری PHEV ها	۹۰ درصد

جدول ۴: تعرفه‌های برق TOU در بازار نوردپول (\$/MWh).

پرباری (peak)	میان‌باری (shoulder)	کم‌باری (valley)
۵۵	۵۲	۵۰

معادلات (۷-۸) با در نظر گرفتن بازده تبدیل AC/DC و DC/AC برای مبدل شارژ، مقدار توان مفید شارژ و دشارژ جهت خودرو را نشان می‌دهند. در این روابط γ بازده مبدل باتری، $ch(t)$ و $dch(t)$ نیز به ترتیب مقدار توان شارژ و دشارژ شده توسط باتری را در بازه زمانی t نشان می‌دهد. واضح است که اگر دشارژی در بازه t صورت نگیرد، $dch(t)$ در آن بازه برابر با صفر خواهد گردید.

کنترلر بایستی در بازه زمانی مجاز $[a_i, d_i]$ شارژ هر PHEV را کامل کند. این محدودیت در رابطه (۹) آورده شده است. رابطه (۱۰) که در آن t اندیس بازه زمانی است، مقدار کل انرژی باتری را در پایان بازه t (E_i)، با توجه به میزان شارژ و دشارژ باتری در آن بازه زمانی نشان می‌دهد. سرانجام روابط (۱۱-۱۳) محدودیت‌های مربوط به متغیرهای مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهند.

۴. نتایج عددی

برای بررسی مدل ارائه شده یک پارکینگ با ظرفیت هزار PHEV نظر گرفته شده و با استفاده از پیوند بین نرم‌افزارهای MATLAB و GAMS [۱۵] نتایج عددی حاصل گردید. برای هر کدام از خودروها با توجه به توابع توزیع احتمال قسمت ۲ پارامترهای زمان شروع و پایان شارژ، مسافت پیموده شده و مقدار شارژ اولیه هر PHEV، تولید شده و سپس جهت تبیین فواید برنامه‌ریزی شارژ PHEV ها و نیز تأثیر V2G، سه سناریوی مختلف برای استراتژی شارژ PHEV های پارکینگ در نظر گرفته شده است:

۱- شارژ بدون کنترل PHEV ها و بدون قابلیت V2G؛

۲- شارژ کنترل شده PHEV ها بدون قابلیت V2G؛

۳- شارژ کنترل شده PHEV ها با قابلیت V2G.

همان‌گونه که مشخص است تنها در سناریوهای ۲ و ۳ برای شارژ PHEV ها برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد. با توجه به برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته انتظار می‌رود که به منظور کمینه کردن هزینه پارکینگ، شارژ PHEV ها در زمان‌هایی که تعرفه برق پایین است صورت بگیرد. ورودی‌های مسئله شامل مشخصات PHEV ها و نیز تعرفه‌های برق می‌باشد؛ همچنین زمان و سطح شارژ و دشارژ باتری هر کدام از PHEV ها در بازه زمانی مجاز شارژ $[a_i, d_i]$ خروجی‌های برنامه می‌باشند.

¹ Time-Of-Use

سناریو با در نظر گرفتن قابلیت V2G بابت شارژ کامل PHEV ها بایستی به صورت روزانه پردازد، برابر ۶۶۷/۸۳۳ دلار است؛ بنابراین در کل هزینه پارکینگ برابر با ۵۶۳/۵۵۴ دلار می‌باشد که در مقایسه با سناریوهای ۱ و ۲ کاهش قابل توجهی را دارد.

در این سناریو پارکینگ ۱۵۱۸۴/۰۰۷ کیلووات را با استفاده از قابلیت V2G به شبکه تحویل می‌دهد که ۹۳/۴۲ درصد این توان در ساعات پیک به شبکه تزریق شده است و می‌تواند برای اپراتور سیستم بسیار کارگشا باشد. از نکات جالب توجه در این سناریو این است که کل بار مورد نیاز پارکینگ برای شارژ کامل PHEV ها با در نظر گرفتن قابلیت V2G در این حالت برابر ۲۹۱۱۲/۵۲۶ کیلووات ساعت می‌باشد که صفر درصد آن در ساعات پیک رخ داده است.

هزینه پرداختی و پیک بار پارکینگ در سناریوهای مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است.

همچنین برای نشان دادن منحنی شارژ PHEV ها در سناریوهای مختلف، به طور نمونه یک PHEV با مقدار شارژ اولیه (KWh) ۱۳۰۹۸۲ (SOC₀) در نظر گرفته شده است. این خودرو در ساعت ۱۸ وارد پارکینگ شده و ساعت ۷ صبح روز بعد آن را ترک خواهد کرد.

برنامه‌ریزی شارژ این خودرو باید به گونه‌ای باشد که هنگام خروج خودرو از پارکینگ، خودرو دارای بیشینه شارژ ممکن (ظرفیت باتری) باشد. منحنی شارژ این خودرو در سناریوهای مختلف در شکل‌های (۲ تا ۴) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در سناریوی یک در ساعات پیک بار شارژ خودرو صورت گرفته است (رنگ قرمز در نمودار)، که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ امنیت شبکه مطلوب نمی‌باشد. در حالی که در شکل‌های ۳ و ۴ که به ترتیب مربوط به سناریوهای ۲ و ۳ می‌باشند، ملاحظه می‌گردد که در ساعات پیک هیچ شارژی صورت نگرفته است؛ بعلاوه اینکه در سناریوی ۳ با استفاده از قابلیت V2G مقداری توان نیز در ساعات پیک به شبکه تزریق شده است.

جدول ۵: هزینه پرداختی و پیک بار پارکینگ در سناریوهای مختلف

سناریوهای شارژ	هزینه پرداختی پارکینگ (دلار)	مقدار توان شارژ شده در ساعات پیک بار (درصد)
شارژ کنترل نشده بدون V2G	۶۶۷/۸۳۳	۸۸/۲۴
شارژ کنترل شده بدون V2G	۶۰۹/۸۲۲	صفر
شارژ کنترل شده با V2G	۵۶۳/۵۵۴	صفر

هزینه‌ای که پارکینگ در این سناریو بابت شارژ کامل PHEV ها بایستی به صورت روزانه پردازد، برابر ۶۶۷/۸۳۳ دلار است. همچنین کل بار مورد نیاز پارکینگ برای شارژ کامل PHEV ها در این حالت برابر ۱۲۰۴۰/۸۱۳ کیلووات می‌باشد که ۸۸.۲۴٪ آن در ساعات پیک رخ داده است. این موضوع برای بهره‌بردار شبکه بسیار نامطلوب می‌باشد.

• شارژ کنترل شده PHEV ها بدون قابلیت V2G

در این حالت فرض می‌شود که کنترلی در پارکینگ وظیفه شارژ کلیه PHEV ها را بر عهده دارد؛ لذا هنگامی که خودرو به پارکینگ می‌رسد الزاماً شارژ باتری خودرو شروع نمی‌شود، بلکه کنترل برنامه‌ریزی شارژ را بر این اساس انجام می‌دهد که هزینه پرداختی پارکینگ حداقل گردد. در این سناریو هیچ دشارژی صورت نگرفته و تنها باتری شارژ می‌شود.

هزینه‌ای که پارکینگ در این سناریو بابت شارژ کامل PHEV ها بایستی به صورت روزانه پردازد، برابر ۶۰۹/۸۲۲ دلار است. همچنین کل بار مورد نیاز پارکینگ برای شارژ کامل PHEV ها در این حالت برابر ۱۲۰۴۰/۸۱۳ کیلووات ساعت می‌باشد که صفر درصد آن در ساعات پیک رخ داده است. این مقدار در مقایسه با سناریوی ۱ کاهش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج استنتاج می‌شود، در این حالت نه تنها بار قابل توجهی از سیستم در ساعات پیک حذف گردیده است، بلکه هزینه پرداختی پارکینگ در یک روز نیز با کنترل شارژ به میزان ۵۸/۰۱۱ دلار کاسته شده است که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

• شارژ کنترل شده PHEV ها با قابلیت V2G

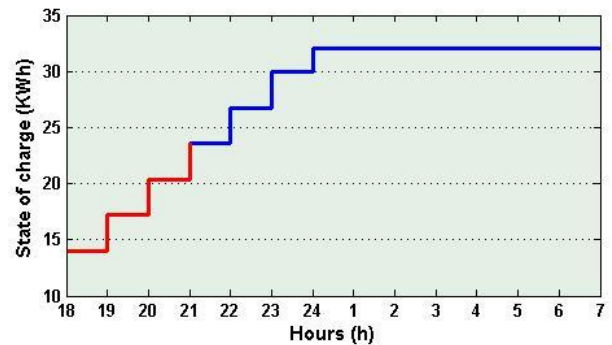
همان گونه که پیشتر نیز گفته شد، در این سناریو علاوه بر اینکه کنترلی در پارکینگ وظیفه شارژ کلیه PHEV ها را بر عهده دارد، پارکینگ می‌تواند در صورت امکان برای افزایش سود خود بخشی از مصرف شبکه را نیز در ساعات پیک تأمین کند و در ازای مقدار باری که در این ساعات برای شبکه تأمین می‌کند، اعتبار مالی $contract_price_e(t)$ که بیشتر از هزینه شارژ است را از اپراتور سیستم دریافت کند. در این مقاله به ازای هر مگاوات ساعت تأمین انرژی در ساعات پیک از جانب پارکینگ، مقدار اعتبار مالی پرداخت شده ۱/۲ برابر هزینه شارژ می‌باشد.

در این حالت در ساعات غیر پیک باتری PHEV ها شارژ شده و از سوی دیگر در ساعات پیک، پارکینگ مقداری از توان خود را به شبکه می‌دهد. در این سناریو پارکینگ با استفاده از قابلیت V2G توانسته است ۸۷/۳۸۱ دلار سود بدست آورد. همچنین هزینه‌ای که پارکینگ در این

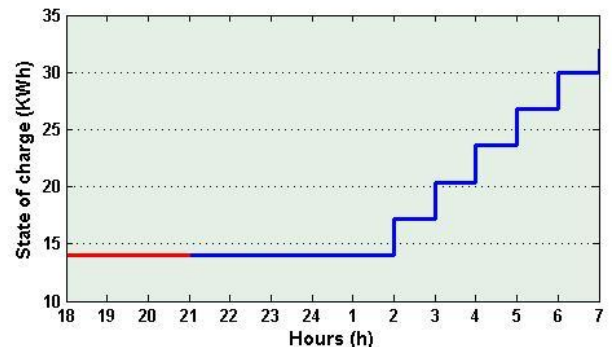
هزینه پرداختی پارکینگ و نیز پیک بار شبکه در بیشترین مقدار خواهند بود. در حالی که شارژ کنترل شده بدون قابلیت V2G امکان داشته باشد، هم پیک بار و هم هزینه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابند. همچنین هنگامی که قابلیت V2G نیز علاوه بر کنترل شارژ وجود داشته باشد، علاوه بر کاهش بیشتر هزینه پیک بار شبکه نیز مسطح‌تر می‌گردد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده ضرورت کنترل شارژ PHEV ها و امکان قابلیت V2G نتیجه می‌شود.

منابع

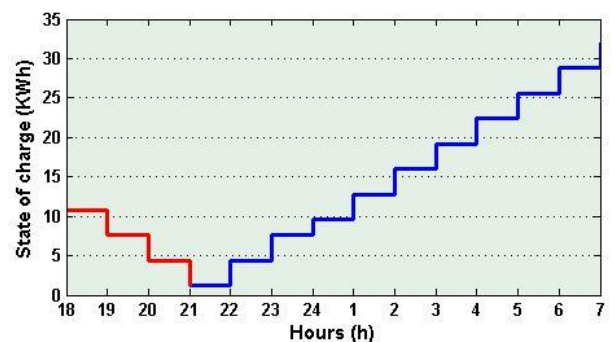
- [1] W. J. Smith, "Plug-in hybrid electric vehicles-a low-carbon solution for Ireland", Energy Policy, Volume 38, pp. 1485-1499, 2010.
- [2] M. Duvall, "Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options for compact sedan and sport utility vehicles", EPRI, Technical Report, 2002.
- [3] L. Dickerman and J. Harrison, "A new car, a new grid," IEEE Power and Energy Mag., vol. 8, no. 2, pp. 55-61, 2010.
- [4] S. W. Hadley, "Impact of plug-in hybrid vehicles on the electric grid," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Technical Report RNL/TM-2006/554, October 2006.
- [5] Y. Saber, and G. K. Venayagamoorthy, "Unit Commitment with Vehicle-to-Grid using Particle Swarm Optimization" IEEE, Power Tech Conference, Bucharest, Romania, June 2009.
- [6] Y. Saber, and G. K. Venayagamoorthy, "Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: A cost-emission optimization" Journal of Power Sources, volume 195, pp. 898-911, 2009.
- [7] S., Han S., Han, K., Sezaki, "Design of An Optimal Aggregator for Vehicle-to-Grid Regulation Service", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010.
- [8] S. W. Hadley and A. Tsvetkova, "Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN , ORN L/T M-2007/150, Jan 2008.
- [9] K. Clement-Nyons, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- [10] S., Han S., Han, K., Sezaki, "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for frequency Regulation", IEEE Trans. on smart grid, Vol. 1, No. 1, pp. 65-72, 2010.
- [11] L. Fernández, T. Román, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks," IEEE Trans. Power Systems, vol. 26, no. 1, Feb. 2011.
- [12] W. Kempton and J. Tomic, "Vehicle-to-grid implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy", Power Source Journal, vol. 144, no. 1, pp. 280-294, 2005.
- [13] Energy Power Research Institute (EPRI), "Plugging in: A Customer's Guide to the Electric Vehicle", 2011. [Online]. Available: http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract_id=00000000001023161.
- [14] E. Pashajavid, M. Aliakbar Golkar, "Charging of plug-in electric vehicles: Stochastic modelling of load demand within domestic grids", ICEE 2012.
- [15] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, GAMS: A User's Guide. Washington, DC: GAMS Development Corporation, 1998. Available at: www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf.
- [16] Available at: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data/>.



شکل ۲: منحنی شارژ خورو در سناریوی شارژ کنترل نشده بدون قابلیت V2G



شکل ۳: منحنی شارژ خورو در سناریوی شارژ کنترل شده بدون قابلیت V2G



شکل ۴: منحنی شارژ خورو در سناریوی شارژ کنترل شده با قابلیت V2G

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی شارژ پارکینگ خودروهای برقی با قابلیت V2G ارائه گردید. برنامه‌ریزی شارژ PHEV ها در پارکینگ با هدف کمینه‌سازی هزینه شارژ پارکینگ صورت گرفته است. برای بررسی استراتژی مورد نظر یک پارکینگ با ظرفیت هزار PHEV در نظر گرفته شده و با استفاده از توابع توزیع احتمال مناسب پارامترهای تصادفی برای هر کدام از خودروها تولید گردید. نتایج مطالعات عددی نشان داد، در حالی که هیچ کنترل شارژی بر روی PHEV ها وجود نداشته باشد