

بهره‌برداری بهینه خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع هوشمند

مهدی شفیعی^۱، دانشجوی دکتری؛ رضا قاضی^۲، استاد؛ معین معینی اقطاعی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران - shafie@mail.um.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران - rghazi@um.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی انرژی - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - moeini@sharif.edu

چکیده: حضور گسترده انواع منابع تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع می‌تواند چالش‌ها و فرصت‌های گوناگونی را برای شبکه برق ایجاد نماید. چالش‌هایی در راستای عملکرد فنی و اقتصادی شبکه‌های برق و فرصت‌هایی برای به‌کارگیری آن‌ها به‌عنوان یک منبع انرژی الکتریکی. بر این اساس در این مقاله یک چارچوب برنامه‌ریزی دومرحله‌ای به‌منظور مدیریت هم‌زمان تعداد زیادی خودروی الکتریکی و منابع تولید پراکنده با مالکیت خصوصی در مرحله اول با هدف افزایش سود خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده و در نهایت با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری معرفی و مورد بررسی قرار گرفته است. چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع متصل شده به باس ۵ از شبکه نمونه RBTS آزمایش شده است. جهت حل مسئله و انتخاب جواب بهینه از روش بهینه‌سازی CPLEX استفاده شده است. نتایج نشان داده‌اند که مدیریت مناسب خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده به‌عنوان یک نهاد کارآمد موجب بهره‌مندی اقتصادی صاحبان خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده و شبکه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: خودرو الکتریکی، منابع تولید پراکنده، هماهنگ‌کننده، عدم قطعیت.

Optimal utilization of electric vehicles and DG resources in smart distribution system

M. Shafiee¹, PhD Student; R. Ghazi², Professor; M. Moeini Aghtaie³, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: shafie@mail.um.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: rghazi@um.ac.ir

3- Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: moeini@sharif.edu

Abstract: The widespread growing of the distributed generation (DG) and electric vehicles (EVs) in distribution networks could be a variety of challenges and opportunities for the electricity network. Despite of arising various technical and economic challenges in distribution networks, these two important events can provide opportunities as electrical energy resources. Accordingly, in this paper, a two-stage scheduling framework has been presented and investigated to manage a large number of electric vehicles in the presence of DGs firstly with the aim of increasing the profits of electric vehicles and DGs and ultimately aimed at reducing operating costs. The proposed scheduling framework is tested on a distribution network connected to 5 bus RBTS system. In order to solve the problem and choose the best solution the CPLEX optimization method is used. The results show that by proper management of electric vehicles and distributed generation resources as an efficient tool, the owners of electric vehicles, distributed generation resources and network all can benefit.

Keywords: electric vehicle, distributed generation resources, aggregator, uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

نام نویسنده مسئول: رضا قاضی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - مشهد - میدان آزادی - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - کد پستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴

S^{PV}	سطح کل سیستم فتوولتائیک	فهرست علائم
T_a	دمای محیط	- متغیرهای باینری
η_v^{Charge}	ضریب بازدهی شارژ خودروی الکتریکی v	وضعیت شارژ و دشارژ خودرو الکتریکی در ساعت t
$\eta_v^{Dcharge}$	ضریب بازدهی دشارژ خودروی الکتریکی v	$X(v,t)/Y(v,t)$
$P_{Dcharge,v}^{Max}$	حداکثر توان قابل دشارژ خودروی الکتریکی v	$U(j,t)$
$P_{Charge,v}^{Max}$	حداکثر توان قابل شارژ خودروی الکتریکی v	وضعیت روشن و یا خاموش بودن مولد j در ساعت t
SOC_{des}^v	میزان سطح شارژ مطلوب خودروی الکتریکی v	- متغیرهای پیوسته
$SOC_{initial}^v$	میزان سطح شارژ اولیه خودروی الکتریکی v	$P_{EV}^{Dcharge}(v,t)$
ψ_v^{Max}	حداکثر محدودیت ظرفیت باتری خودروی الکتریکی	$P_{EV}^{Charge}(v,t)$
ψ_v^{Min}	حداقل محدودیت ظرفیت باتری خودروی الکتریکی	$E_s(v,t)$
ϕ_v^{Max}	حداکثر درصد قابل‌استفاده از ظرفیت باتری خودروی الکتریکی v	$P_{Des}^{Charge}(v)$
ϕ_v^{Min}	حداقل درصد قابل‌استفاده از ظرفیت باتری خودروی الکتریکی v	$P_{Des}^{Dcharge}(v)$
$E_{BatCap,v}$	ظرفیت باتری خودروی الکتریکی v	D^v
K_{Charge}	ضریب وزنی مربوط به شارژ خودروهای الکتریکی	$P_{NTW}(t)$
$K_{Dcharge}$	ضریب وزنی مربوط به دشارژ خودروهای الکتریکی	$P_w(t)$
NS^{Max}	حداکثر تعداد حالات سوئیچینگ از وضعیت شارژ به دشارژ و یا برعکس برای هر خودرو الکتریکی	$P_{pv}(t)$
P_{NTW}^{Max}	حداکثر توان مجاز قابل دریافت از شبکه بالادستی	$P_{DG}(j,t)$
P_{TRANS}^{Max}	حداکثر ظرفیت ترانس	$P_{LOSS}(t)$
$S(n,m,t)$	توان ظاهری جاری شده از شین n به m در ساعت t	I_r^t
$S_{n,m}^{Max}$	حداکثر ظرفیت خطوط	$P_{LOAD}(t)$
$V(n,t)$	ولتاژ در شین n	$Pr_{MRT}(t)$
V_n^{Min}/V_n^{Max}	حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز در شین n	$Pr_{EV}^{Charge}(t)$
$P_{DG,j}^{Max}$	حداکثر توان خروجی منبع تولید پراکنده j	$Pr_{EV}^{Dcharge}(t)$
$P_{DG,j}^{Min}$	حداقل توان خروجی منبع تولید پراکنده j	$Pr_{LOSS}(t)$
Sc_j	هزینه راه‌اندازی منبع تولید پراکنده j	$P_n(t)$
$a(j),b(j)$	ضرایب تابع هزینه منبع تولید پراکنده j	$Q_n(t)$
RUP_{DG}^j	نرخ افزایش توان منبع تولید پراکنده j	$P_{TRANS}(n,t)$
RDN_{DG}^j	نرخ کاهش توان منبع تولید پراکنده j	V_f^t
α,k	ضریب شکل	$f_{1,1}$
β,c	ضریب مقیاس	$f_{1,2}$
Δt	طول بازه زمانی	f_2
		$\delta_n(t)$
		$ Y_{n,m} $
		$\theta_{n,m}$
- مجموعه‌ها		- پارامترها
j	اندیس مربوط به شماره منبع تولید پراکنده	P_{rated}
n,m	اندیس مربوط به شماره شین‌های شبکه	V_r
t	اندیس مربوط به بازه‌های زمانی بهینه‌سازی	V_{ci}
s	اندیس مربوط به شماره سناریو	V_{co}
v	اندیس مربوط به شماره خودروهای الکتریکی	η^{PV}
		توان نامی توربین بادی
		سرعت نامی توربین بادی
		سرعت قطع پایین توربین بادی
		سرعت قطع بالا توربین بادی
		ضریب بازدهی سیستم فتوولتائیک

۱- مقدمه

در کشورهایی با اقتصاد شکوفا، شبکه‌های توزیع برق نقش بسیار مهمی در تأمین بارهای الکتریکی مهم و صنعتی بازی می‌کنند. در چند سال اخیر شاهد ظهور و بروز تکنولوژی‌های مختلفی هستیم که دیدگاه را نسبت به نحوه تولید، انتقال و تحویل آن به متقاضیان انرژی الکتریکی تغییر داده است. فناوری‌هایی مانند تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی. در نظر گرفتن این دو رویداد مهم در شبکه‌های توزیع می‌تواند چالش‌ها و فرصت‌های گوناگونی را برای شبکه برق ایجاد نماید. مطالعات مختلف نشان داده است شبکه‌های توزیع به شدت از نفوذ بالای خودروهای الکتریکی که به صورت ناهم‌هنگ شارژ و دشارژ می‌شوند لطمه خواهند دید. این تأثیرات می‌تواند شامل افزایش بیشینه بار، افزایش تلفات، کاهش در ولتاژ و ضریب بار سیستم و ... باشد [۱]. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند راه‌حل اصلی این تأثیرات نامناسب ایجاد یک پروسه هماهنگ برای شارژ و دشارژ خودروها می‌باشد [۲]. در ادامه به پاره‌ای از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود. در مرجع [۳] سیستم کنترلی برای هماهنگی شارژ خودروها ارائه شده است. هدف از این روش، شارژ در ساعات کم‌باری با قیمت پایین انرژی و هم‌زمان تأمین محدودیت‌های فنی شبکه بوده است. برای تصمیم‌گیری در این سیستم از روش‌های جستجو و شبکه عصبی استفاده شده است. مرجع [۴] در ابتدا به تأثیر شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی بر شبکه توزیع پرداخته است. سپس در این مقاله نشان داده شده است که می‌توان با کنترل مناسب شارژ و دشارژ خودروها ولتاژ و پخش‌دهی خطوط را کنترل کرد. همچنین با کنترل این موضوع می‌توان تعداد خودروهای بیشتری را در شبکه بدون نیاز به تقویت شبکه وارد نمود. در [۵] روش فازی هماهنگ کردن برخط^۱ در شبکه توزیع هوشمند مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این روش کاهش هزینه کلی تولید انرژی و تلفات شبکه بوده است. در این مطالعه تأثیر درجه‌های مختلف نفوذ خودروها بر شاخص‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفته است.

در مراجع [۶] و [۷] به بررسی فنی و اقتصادی تأثیر ورود خودروهای الکتریکی بر شبکه برق ایالات متحده آمریکا پرداخته شده است. این مقالات نشان می‌دهند که افزایش ورود خودروها می‌تواند باعث دشواری در کار بهره‌بردار شبکه شده و قابلیت اطمینان شبکه را پایین بیاورد. در این مقالات استفاده از برنامه‌ریزی شارژ هوشمند و همچنین قابلیت $V2G$ به عنوان روش غلبه بر این مشکل پیشنهاد شده است. در [۸] و [۹] با استفاده از انتخاب بهینه محدوده پارکینگ خودروهای الکتریکی در ساعات بهره‌برداری و نیز برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها به بهبود اهدافی همچون میزان انرژی تأمین نشده، وضعیت ذخیره بهره‌برداری، بهره‌وری ریزش‌بکه، قابلیت اطمینان و کاهش کلیدزنی پرداخته شده است. مرجع [۱۰] به مسئله تأثیر خودروهای الکتریکی بر قابلیت اطمینان شبکه توزیع پرداخته است. در این مطالعه جمع‌کننده‌ها به صورت ایستگاه‌های تعویض باتری در نظر

گرفته شده‌اند. در اینجا از الگوریتمی استفاده شده است که زمان را به نحوی به بازه‌های مختلف تقسیم می‌کند که نوسانات بار قابل چشم‌پوشی باشد. به تبع آن در هر بازه تابع توزیع احتمالاتی انرژی باتری‌ها با در نظر گرفتن الگوی تعویض باتری رانندگان لحاظ گردیده است. در این مقاله، رفتار رانندگان بر مبنای رفتار آن‌ها در ایستگاه‌های پمپ‌بنزین در نظر گرفته شده است. مطالعه بر روی سیستم ۳۴ باسه IEEE صورت پذیرفته است [۱۰].

مرجع [۱۱] روشی را به منظور بررسی تأثیر خودروهای برقی بر میزان سرمایه‌گذاری و تلفات شبکه توزیع ارائه نموده است. مطالعات بر روی دو ناحیه شهری و روستایی انجام پذیرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که شارژ خودروهای برقی در ساعات پیک موجب افزایش ۱۹ درصدی هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد شد در حالی که با شارژ مناسب خودروها در ساعات کم‌باری این هزینه‌ها حدود ۶۰-۷۰ درصد کاهش خواهند یافت. در مرجع [۱۲] شارژ هوشمندانه و غیرهوشمندانه خودروهای الکتریکی در سیستم قدرت آینده با استفاده از مدلی که برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را بهینه می‌نماید، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که شارژ/دشارژ هوشمندانه خودروها بسیار اقتصادی‌تر از شارژ/دشارژ غیرهوشمندانه می‌باشد.

نویسندگان [۱۳] با هدف کمینه‌کردن تلفات شبکه توزیع به ارائه یک روش متمرکز برای کنترل شارژ خودروهای الکتریکی هیبرید می‌پردازند. بدین منظور، با معرفی ساختار مسئله بهینه‌سازی کنترل شارژ متمرکز با هدف کمینه‌کردن تلفات، نشان داده می‌شود که کنترل شارژ متمرکز می‌تواند نه تنها تلفات را در شبکه کاهش دهد بلکه ضریب بار آن را نیز افزایش می‌دهد. نتیجه مهم دیگری که نویسندگان این مقاله بر آن تأکید می‌نمایند این است که اجرای یک برنامه مدیریت شارژ با تابع هدف کمینه‌کردن تلفات می‌تواند پروفیل ولتاژ شبکه را نیز در شینه‌های مختلف بهبود دهد. در مرجع [۱۴]، هماهنگ‌کننده^۲ با اجرای یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بهره‌برداری شبکه با ارضاء قید تأمین بار موردنیاز خودروها سعی در پیدا نمودن بهینه‌ترین برنامه شارژ برای خودروهای الکتریکی دارد. در این مقاله، هر دو حالت مدل کردن هماهنگ‌کننده به عنوان یک گیرنده قیمت و تأثیرگذار بر قیمت پیشنهادی به صاحبان خودرو لحاظ گردیده است.

نویسندگان در مراجع [۱۵] و [۱۶] با ارائه دو روش به کمینه‌کردن تلفات انرژی در ریزش‌بکه‌ها به کمک مدیریت خودروها پرداخته‌اند. در روش اول، مسئله به صورت بهینه‌سازی دومرحله‌ای و در روش دوم یک مسئله بهینه‌سازی محدب مربع محلی پیشنهاد شده است. مهم‌ترین مزیت روش‌های ذکر شده این است که در شبکه‌های با مصرف‌کنندگان با تعداد بالا و سطح نفوذ بالای خودروها، دستیابی به پاسخ تضمین شده است. همچنین در این مراجع تأثیر انواع سیاست‌های مدیریت توان خودروها، شامل مدیریت توان اکتیو و راکتیو

سه رویکرد مختلف برای پخش هم‌زمان این منابع تولید کوچک (توربین‌های بادی) و ذخیره‌های بالقوه پراکنده (خودروهای الکتریکی) معرفی می‌نمایند. در اولین رویکرد پخش تحت عنوان «جستجو برای دره»، هدف اصلی تأمین بار الکتریکی موردنیاز خودروهای الکتریکی در یک ریزشبهکه به‌گونه‌ای است که این انرژی در بازه‌های زمانی با بار کم تأمین گردد. بدین منظور، یک قید اضافه شده است که با شروع پروسه شارژ خودرو امکان قطع آن وجود ندارد. نتایج اعمال این روش بر روی شبکه نمونه نشان می‌دهد که این روش با این قید نمی‌تواند به‌خوبی بار خودروها را به سمتی هدایت نماید که بیشترین همراهی را با توان تولیدی توربین‌های بادی داشته باشد. در روش دوم به‌کار گرفته‌شده تحت عنوان پخش قابل قطع باز همان هدف روش قبلی بهره‌برداری دنبال می‌شود با این تفاوت که می‌تواند در این رویکرد پروسه شارژ خودروها را به‌صورت منقطع در مطالعات لحاظ نماید. در روش سوم تحت عنوان روش پخش با نرخ شارژ متفاوت همانند دو روش قبل سعی در بهینه نمودن روند شارژ خودروها با هدف داشتن بیشترین تطابق با نمودار تولید توربین‌های بادی دارد با این تفاوت که نرخ‌های شارژ متفاوتی را برای خودروهای متفاوت لحاظ می‌کند.

مرجع [۲۶] به بیان یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پرداخته است. در مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی منابع در دو سطح تجمیع‌کننده‌ها و بهره‌بردار سیستم انجام شده است. در مرحله اول بعدازاین که تجمیع‌کننده‌ها تمامی اطلاعات مربوط به خودروها و منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر را دریافت کردند با انجام محاسبات میزان انرژی موردنیاز و یا مازاد انرژی خود را به بهره‌بردار اعلام می‌کنند. در مرحله دوم بهره‌بردار سیستم برنامه‌ریزی تولید و ذخیره انرژی را با هدف کاهش هزینه‌ها انجام می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند با مدیریت مناسب خودروهای الکتریکی میزان بار الکتریکی شبکه در ساعات اوج افزایش شدید نمی‌یابد به‌عبارت‌دیگر استفاده از مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی باعث مسطح‌تر شدن منحنی بار شبکه شده است.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته یکی از اصلی‌ترین مسائلی که مطالعات کمی در مورد آن انجام شده مدیریت هم‌زمان منابع تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی به‌عنوان دو نهاد کاملاً مستقل و خصوصی می‌باشد. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که صاحبان منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی سعی در حداکثر کردن سود خود دارند که این عامل به‌نوبه خود می‌تواند باعث بروز مشکلات فراوانی همچون افزایش تلفات، پرشدگی خطوط، افزایش هزینه‌های تقویت شبکه و ... در شبکه‌های توزیع گردد. از این‌رو در این مقاله سعی خواهد شد با ارائه یک چارچوب برنامه‌ریزی دومرحله‌ای، خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده با مالکیت خصوصی که هدف آن‌ها حداکثر کردن سود مربوط به خود می‌باشد به‌گونه‌ای مدیریت شوند که علاوه بر رضایتمندی بالای آن‌ها به این مسئله مهم یعنی کاهش

مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین استراتژی شارژ جهت کاهش تلفات انرژی پیشنهاد داده شده است.

مراجع مختلف دیگری نیز با بهره‌گیری از رویکرد متمرکز سعی در بهینه نمودن الگوی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با ارضاء یک سری معیارهای از قبل تعیین‌شده دارند. بیشینه نمودن SOC^f خودروهای متصل به شبکه در زمان قطع از شبکه [۱۷]، کمینه نمودن گرفتگی ناشی از حضور خودروهای الکتریکی با حفظ قید ولتاژ شبکه [۱۸] و کاهش بیشینه بار شبکه و هم‌زمان کمینه نمودن نوسانات توان در پروفیل بار شبکه از طریق یک چارچوب بهینه‌سازی [۱۹-۲۱] از انواع معیارهایی است که تا به حال محققان با بهره‌گیری از رویکرد کنترل شارژ متمرکز سعی در بهینه نمودن آن‌ها داشته‌اند.

یکی دیگر از اصلی‌ترین مسائل در مطالعات شبکه‌های توزیع، لحاظ نمودن هم‌زمان اثرات تولیدات پراکنده به‌خصوص از نوع تجدیدپذیر و انواع خودروهای الکتریکی می‌باشد. این نکته از آن جهت اهمیت دارد که نشان‌دهنده واقعیت آینده سیستم‌های قدرت بسیاری از کشورها می‌باشد. در این راستا، بخشی از مطالعات صورت‌گرفته در ادامه آورده شده است.

نویسندگان در مرجع [۲۲] یک استراتژی ساده برای استفاده مؤثر از ظرفیت باتری خودروها جهت کاهش تأثیرات سیستم فتوولتائیک بر اساس مفهوم V2G پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله یک روش بهینه شارژ/دشارژ جهت استفاده از ظرفیت خودروها به‌منظور کنترل ولتاژ شبکه ارائه شده است. در مرجع [۲۳] یک طرح کنترلی سلسله‌مراتبی دومرحله‌ای جهت هماهنگی شارژ خودروها و تولید توربین‌های بادی در ریزشبهکه پیشنهاد شده است. در این مقاله عنوان‌شده که مینیمم کردن توان تبدالی می‌تواند باعث کاهش عدم‌قطعیت مربوط به منابع تولید پراکنده و در نتیجه افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده شود.

مرجع [۲۴]، یک الگوریتم جدید برای مطالعات برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع با هدف بیشینه کردن استفاده از منابع تولیدات پراکنده تجدیدپذیر و هم‌چنین پوشش نیازهای خودروهای الکتریکی در میزان نفوذهای بالا ارائه نموده است. در این الگوریتم برنامه‌ریزی که بر مبنای روش بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است به شرکت‌های توزیع این امکان را می‌دهد که با دید بهتری نسبت به تأثیرات حضور خودروهای الکتریکی و هم‌چنین تولیدات پراکنده تجدیدپذیر به‌عنوان دو متغیر تصادفی اقدام به انتخاب طرح‌های توسعه شبکه‌های توزیع بنمایند. توابع هدف مسئله بهینه‌سازی حاصل کمینه‌کردن گازهای گلخانه‌ای تولیدی و هزینه‌های سیستم در بازه برنامه‌ریزی می‌باشند. با حل این مسئله، می‌توان میزان نفوذ بهینه خودروهای الکتریکی و زمان و ظرفیت تولیدات پراکنده موردنیاز را پیدا نمود.

نویسندگان در مرجع [۲۵] با بیان این که حضور هم‌زمان انواع خودروهای الکتریکی و هم‌چنین تعداد زیاد توربین‌های بادی با ظرفیت کم، چالش‌های فنی زیادی را برای بهره‌برداران شبکه توزیع با هدف تأمین انرژی مطمئن و بهینه‌سازی پخش انرژی به وجود آورده است،

قیمت بازار برق سعی در ماکزیمم کردن سود خود دارند. پس از پایان مرحله اول برنامه‌ریزی پیشنهادی، برنامه بهینه شارژ/دشارژ مربوط به خودروها و الگوی تولید واحدها به بهره‌بردار شبکه گزارش می‌شود.

در مرحله دوم برنامه‌ریزی انرژی پیشنهادی، بهره‌بردار شبکه پس از دریافت برنامه بهینه شارژ/دشارژ مربوط به خودروها و برنامه بهینه تولید منابع تولید پراکنده سعی دارد در هر سناریو با خرید انرژی از بازار، تغییر برنامه تولید بهینه منابع تولید پراکنده و تغییر برنامه شارژ/دشارژ بهینه خودروها، برنامه‌ریزی انرژی منابع موجود را به گونه‌ای انجام دهد که ضمن تأمین بار موردنیاز شبکه هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد. الگوی استفاده از منابع، برنامه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی به همراه توان خریداری شده از شبکه به‌عنوان خروجی‌های اولیه این مرحله برنامه‌ریزی هستند. در ادامه اگرچه این خروجی‌ها از نظر صاحبان خودروها و منابع تولید پراکنده بهینه بوده ولی هیچ تضمینی در خصوص تأمین قیود فنی شبکه ارائه نمی‌دهند. از این رو بهره‌بردار شبکه پس از انجام محاسبات پخش بار کلیه قیود فنی شبکه را چک می‌کند و در صورت تأمین نشدن هر یک از قیود، با اعمال محدودیت‌های جدید، مرحله دوم بهینه‌سازی را تکرار می‌کند. این کار تا زمانی که کلیه قیود شبکه تأمین شوند ادامه می‌یابد. در ادامه فرمولاسیون مربوط به هر مرحله آورده شده است.

۲-۴ فرمولاسیون مسئله

۲-۴-۱ فرمولاسیون مرحله اول برنامه‌ریزی پیشنهادی

در مرحله اول چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی هماهنگ‌کننده‌ها و صاحبان منابع تولید پراکنده با اجرای مسئله بهینه‌سازی به دنبال حداکثر کردن سود خود می‌باشند. در ادامه روابط مربوط به هر یک آورده شده است.

۲-۴-۲ فرمولاسیون مربوط به هماهنگ‌کننده خودروها

تابع هدف مربوط به حداکثر کردن سود خودروها از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$f_{1,1} = \max \left(\sum_{t=1}^T \left[\sum_{v=1}^V \left(P_{EV}^{DCharge}(v,t) \times Pr_{EV}^{DCharge}(t) - P_{EV}^{Charge}(v,t) \times Pr_{EV}^{Charge}(t) \right) \right] \times \Delta t \right) \quad (1)$$

قیود مربوط به خودروها به شرح زیر می‌باشد [۲۶]:

در برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ یک خودرو باید توجه شود که در یک لحظه مشخص نباید خودرو به‌طور هم‌زمان در دو حالت شارژ و دشارژ برنامه‌ریزی شود.

$$X(v,t) + Y(v,t) \leq 1 \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \quad (2)$$

$$\forall v \in \{1, 2, \dots, V\}; X, Y \in \{0, 1\}$$

معادله پیوستگی زمانی شارژ و دشارژ خودرو در طول دوره برنامه‌ریزی به‌صورت رابطه زیر داده شده است.

هزینه‌های بهره‌برداری با در نظر گرفتن قیود شبکه پرداخته شود. جنبه‌های نوآوری مقاله به‌صورت زیر بیان شده است:

- ارائه یک چارچوب برنامه‌ریزی دومرحله‌ای برای مدیریت منابع انرژی در یک شبکه توزیع با هدف دستیابی به یک طرح عملی و با لحاظ نمودن خواسته‌ها و نیازهای بازیگران مختلف

- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی مرتبط با برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی از دیدگاه صاحبان آن‌ها و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های آن‌ها

- مدل‌سازی و حل مسئله بهینه‌سازی مرتبط با برنامه‌ریزی منابع تولیدات پراکنده و وارد کردن اثر آن در مسئله برنامه‌ریزی منابع انرژی شبکه توزیع

- خطی‌سازی مسئله بهینه‌سازی مرتبط با مسئله برنامه‌ریزی منابع انرژی

ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌یافته است: در بخش دوم به بیان مسئله، چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی و فرمولاسیون مسئله پرداخته شده است. مطالعه موردی در بخش سوم تشریح شده و در نهایت در بخش چهارم، به بیان نتایج پرداخته شده است.

۲- بیان مسئله

در این قسمت روند مدل‌سازی برنامه‌ریزی انرژی در شبکه توزیع با روش پیشنهادی شرح داده شده است. در ابتدا چارچوب برنامه‌ریزی مدل پیشنهادی شرح داده می‌شود. سپس فرمولاسیون مسئله به همراه قیود برنامه‌ریزی آورده شده است.

۲-۴-۱ چارچوب برنامه‌ریزی انرژی پیشنهادی

با توجه به افزایش حضور خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع نیاز به برنامه کنترلی مناسب جهت کنترل فرآیند شارژ و دشارژ خودروها به‌عنوان یک بار جدید و منابع تولید پراکنده به‌عنوان یک منبع تولید انرژی بیش‌ازپیش احساس می‌شود [۲۷]. در ادامه یک الگوریتم دومرحله‌ای برای رسیدن به یک چارچوب برنامه‌ریزی جامع که در آن نه تنها محدودیت‌های فنی شبکه برآورده شوند بلکه حفظ حریم خصوصی و راحتی صاحبان خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده و سایر بازیگران در نظر گرفته شود ارائه شده است. چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی شامل دو مرحله می‌باشد.

در مرحله اول هماهنگ‌کننده‌های خودروهای الکتریکی و صاحبان منابع تولید پراکنده با اجرای برنامه بهینه‌سازی جداگانه با در نظر گرفتن خواسته‌ها و محدودیت‌های خود سعی در ماکزیمم کردن سود خود در طول بازه برنامه‌ریزی دارند. برای این منظور صاحبان خودروهای الکتریکی اطلاعاتی همچون زمان رسیدن به پارکینگ، زمان خروج از پارکینگ، وضعیت شارژ اولیه و وضعیت شارژ نهایی را در اختیار هماهنگ‌کننده‌ها قرار می‌دهند تا برنامه بهینه شارژ/دشارژ مربوط به خودروها به‌دست آید؛ و از طرف دیگر صاحبان منابع تولید پراکنده با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به منابع تولید پراکنده و

۲ ۴ - فرمولاسیون مربوط به منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر از آنجایی که منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر با مالکیت خصوصی در نظر گرفته شده‌اند تابع هدف مربوط به آن‌ها (حداکثر کردن سود) به صورت رابطه (۱۶) می‌باشد.

$$f_{1,2} = \max \left(\sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J \{P_{DG}(j,t) \times Pr_{MRT}(t) - C_{DG}(j,t)\} \right] \times \Delta t \right) \quad (16)$$

قیود مربوط به منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر به شرح زیر می‌باشد:

هزینه منابع تجدیدناپذیر به صورت تابعی از توان خروجی آن‌ها مدل می‌شود. به منظور استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی، توابع هزینه با تقریب مناسبی به شکل زیر در نظر گرفته شده‌اند [۲۸].

$$C_{DG}(j,t) = a_j + b_j * P_{DG}(j,t) \quad (17)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall j \in \{1, 2, \dots, J\}$$

محدودیت در حداکثر و حداقل میزان توان تولیدی مولدهای تولید پراکنده تجدیدناپذیر به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$P_{DG}(j,t) \leq P_{DG,j}^{Max} \times u(j,t) \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (18)$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, J\}$$

$$P_{DG}(j,t) \geq P_{DG,j}^{Min} \times u(j,t) \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (19)$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, J\}$$

هزینه راه‌اندازی مولدهای تولید پراکنده تجدیدناپذیر به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$SU(j,t) = Sc_j \times (u(j,t) - u(j,t-1)) \quad (20)$$

$$SU(j,t) \geq 0 \quad (21)$$

محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان مربوط به منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر به صورت زیر می‌باشد:

$$(P_{DG}(j,t+1) - P_{DG}(j,t)) \leq RUP_{DG}^j \quad (22)$$

$$(P_{DG}(j,t) - P_{DG}(j,t+1)) \leq RDN_{DG}^j \quad (23)$$

با انجام برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای باینری الگوی بهینه تولید منابع تولید پراکنده به شرح زیر به دست می‌آید.

$$P_{Des}^{DG}(j) = [P_{DG}(j,t)] \quad j \in [1-J], t \in [1-T] \quad (24)$$

۲ ۴ - فرمولاسیون مرحله دوم برنامه‌ریزی پیشنهادی

در مرحله دوم، بهره‌بردار شبکه پس از دریافت اطلاعات مرحله اول (روابط (۱۴)، (۱۵) و (۲۴)) در هر سناریو سعی می‌کند با خرید انرژی از بازار، تغییر برنامه بهینه تولید منابع تولید پراکنده و همچنین تغییر پروفیل شارژ/دشارژ مطلوب خودروها، برنامه‌ریزی انرژی منابع موجود را به گونه‌ای انجام دهد که ضمن تأمین خواسته صاحبان خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده، قیود فنی شبکه و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد. برای رسیدن به این اهداف، برنامه بهینه‌سازی زیر توسط بهره‌بردار سیستم برای همه سناریوها انجام می‌پذیرد:

$$E_s(v,t) = E_s(v,t-1) + \eta_v^{Charge} \times P_{EV}^{Charge}(v,t) * \Delta t - \frac{1}{\eta_v^{Dcharge}} \times (P_{EV}^{Dcharge}(v,t) \times \Delta t) \quad (3)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

محدودیت توان قابل شارژ و دشارژ باتری هر خودرو در هر دوره به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$P_{EV}^{Charge}(v,t) \leq P_{Charge,v}^{Max} \times X(v,t) \quad (4)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

$$P_{EV}^{Dcharge}(v,t) \leq P_{Dcharge,v}^{Max} \times Y(v,t) \quad (5)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

دشارژ باتری خودرو الکتریکی تا حد معین ψ_v^{Min} و شارژ آن تا حداکثر مقدار معین ψ_v^{Max} باعث جلوگیری از خرابی زودرس باتری و افزایش طول عمر مفید آن می‌شود [۲۶].

$$E_s(v,t) \leq \psi_v^{Max} \quad (6)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

$$E_s(s,v,t) \geq \psi_v^{Min} \quad (7)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

که ψ_v^{Max} و ψ_v^{Min} به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\psi_v^{Max} = \phi_v^{Max} \times E_{BatCap,v} \quad \forall v \in \{1, 2, \dots, V\} \quad (8)$$

$$\psi_v^{Min} = \phi_v^{Min} \times E_{BatCap,v} \quad \forall v \in \{1, 2, \dots, V\} \quad (9)$$

محدودیت شارژ و دشارژ باتری در هر ساعت متناسب با میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری در دوره قبل و حداکثر ظرفیت باتری اعمال می‌شود [۲۶]:

$$\frac{1}{\eta_v^{Dcharge}} \times (P_{EV}^{Dcharge}(v,t) \times \Delta t) \leq E_s(v,t-1) \quad (10)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

$$\eta_v^{Charge} \times P_{EV}^{Charge}(v,t) \times \Delta t \leq (\psi_v^{Max} - E_s(v,t-1)) \quad (11)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

میزان انرژی ذخیره‌شده مطلوب در باتری هر خودرو در هنگام خروج از پارکینگ به صورت رابطه زیر داده شده است:

$$SOC_{des}^v = SOC_{initial}^v + randnumber(0, [1 - SOC_{initial}^v]) \quad (12)$$

$$\forall v \in \{1, 2, \dots, V\}$$

محدودیت تعداد دفعات تغییر وضعیت از حالت شارژ به دشارژ و برعکس با توجه به سن باتری خودروها به صورت رابطه زیر داده شده است [۲۸]:

$$D^v \leq NS^{Max} \quad (13)$$

با انجام برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای باینری پروفیل شارژ/دشارژ مطلوب خودروها به شرح زیر به دست می‌آید.

$$P_{Des}^{Charge}(v) = [P_{EV}^{Charge}(v,t)] \quad v \in [1-V], t \in [1-T] \quad (14)$$

$$P_{Des}^{DCharge}(v) = [P_{EV}^{DCharge}(v,t)] \quad v \in [1-V], t \in [1-T] \quad (15)$$

۲-۲-۲-۲-۲- قیود مربوط به خودروهای الکتریکی

روابط (۲) - (۱۳) قیود مربوط به خودروهای الکتریکی هستند که باید در این مرحله برنامه‌ریزی انرژی در نظر گرفته شوند.

۲-۲-۲-۲-۳- قیود مربوط به منابع تولید پراکنده

۲-۲-۲-۲-۳-۱- منابع تجدیدناپذیر

روابط (۱۸) - (۲۳) قیود مربوط به منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر هستند که باید در برنامه‌ریزی انرژی در نظر گرفته شوند.

۲-۲-۲-۲-۳-۲- منابع تجدیدپذیر

از آنجایی که منبع انرژی اولیه توربین‌های بادی و واحدهای فتوولتائیک باد و خورشید است، در مطالعات موجود برای مدل کردن توان خروجی آن‌ها از توابع احتمالاتی استفاده شده که در ادامه شرح داده می‌شود.

۲-۲-۲-۲-۳-۱- مدل احتمالاتی سیستم فتوولتائیک

در این مطالعه از تابع چگالی احتمال بتا برای مدل کردن توان سیستم فتوولتائیک استفاده شده است [۲۹].

$$f(I_r^t) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times I_r^{t(\alpha-1)} \times (1 - I_r^t)^{\beta-1} & \text{for } 0 \leq I_r^t \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

با توجه به توزیع شدت تابش پیش‌بینی شده در هر ناحیه و تابع تبدیل تابش به توان، می‌توان توان خروجی سیستم فتوولتائیک را به‌ازای هر شدت تابش در هر زمان محاسبه نمود [۳۰].

$$P_{pv} = \eta^{pv} \times S_r^{pv} \times I_r^t (1 - 0.005 \times (T_a - 25)) \quad (34)$$

۲-۲-۲-۳-۲-۲- مدل احتمالاتی توربین بادی

در این مطالعه از تابع چگالی احتمال رایلی^۵ برای مدل کردن رفتار سرعت باد استفاده شده است [۳۱].

$$f(v_f^t) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v_f^t}{c}\right)^{k-1} e^{-\frac{v_f^t}{c}^k} \quad 0 \leq v_f^t \leq \infty \quad (35)$$

همچنین توان خروجی توربین بادی در هر لحظه با استفاده از تابع تبدیل توان که در رابطه زیر داده شده است، قابل محاسبه است [۳۲].

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_f^t \leq v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(v_f^t - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v_f^t \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v_f^t \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v_f^t \end{cases} \quad (36)$$

شکل (۱) فلوچارت برنامه‌ریزی انرژی پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است هماهنگ‌کننده‌ها و صاحبان منابع تولید پراکنده با اجرای برنامه بهینه‌سازی، پروفیل شارژ/دشارژ خودروها و الگوی تولید منابع تولید پراکنده را به‌دست آورده و آن را به بهره‌بردار شبکه گزارش می‌دهند. سپس بهره‌بردار باید برای همه سناریوها با اجرای یک برنامه‌ریزی غیرخطی با متغیرهای باینری (رابط (۲۵)) توان خروجی مربوط به هر یک از منابع تولید پراکنده، توان خریداری شده از

$$f_2 = \min$$

$$\left(\sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & (P_{NTW}(t) * Pr_{MRT}(t) + P_{LOSS}(t) * Pr_{LOSS}(t)) \\ & + \left| \sum_{j=1}^J (P_{DG}(j,t) - P_{Des}^{DG}(j,t)) \right| \times K_{DG} \\ & + \left| \sum_{v=1}^V (P_{EV}^{Charge}(v,t) - P_{Des}^{Charge}(v,t)) \right| \times K_{Charge} \\ & + \left| \sum_{v=1}^V (P_{EV}^{Dcharge}(v,t) - P_{Des}^{Dcharge}(v,t)) \right| \times K_{Dcharge} \end{aligned} \right\} \times \Delta t \right) \quad (25)$$

همان‌گونه که از رابطه (۲۵) مشخص است تابع هدف برنامه بهینه‌سازی در این مرحله شامل چهار بخش می‌باشد. بخش اول هزینه انرژی خریداری شده از بازار و هزینه تلفات را نشان می‌دهد. هزینه پرداختی به صاحبان منابع تولید پراکنده و صاحبان خودروهای الکتریکی جهت شرکت در برنامه پیشنهادی در قسمت دوم، سوم و چهارم آورده شده است. قیود مربوط به این مرحله برنامه‌ریزی به‌قرار زیر است:

۲-۲-۲-۲-۱- قیود شبکه

۲-۲-۲-۲-۱-۱- قید تعادل توان

مجموع توان‌های تولیدشده به همراه توان خریداری شده از بازار برق می‌بایست برابر با مقدار مصرف باشد.

$$P_{NTW}(t) + \sum_{w=1}^W P_w(t) + \sum_{pv=1}^{PV} P_{pv}(t) + \sum_{j=1}^J P_{DG}(j,t) + \sum_{v=1}^V P_{EV}^{Dcharge}(v,t) = \sum_{v=1}^V P_{EV}^{Charge}(v,t) + P_{LOAD}(t) + P_{LOSS}(t) \quad (26)$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

۲-۲-۲-۲-۲- قیود فنی شبکه

قیود فنی مربوط به شبکه در ادامه آورده شده است [۲۶]:

$$P_n(t) = \quad (27)$$

$$\sum_{m=1}^N |V_n(t)| |V_m(t)| |Y_{n,m}| \cos \left(\delta_m(t) - \delta_n(t) \right) \quad \forall n, t \quad (28)$$

$$Q_n(t) = \quad (28)$$

$$- \sum_{m=1}^N |V_n(t)| |V_m(t)| |Y_{n,m}| \sin \left(\delta_m(t) - \delta_n(t) \right) \quad \forall n, t \quad (29)$$

$$|S(n, m, t)| \leq S_{n,m}^{max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall n, m \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (29)$$

$$V_n^{Min} \leq V(n, t) \leq V_n^{Max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (30)$$

$$P_{NTW}(t) \leq P_{NTW}^{max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, 24\} \quad (31)$$

$$P_{TRANS}(n, t) \leq P_{TRANS}^{Max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}; \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (32)$$

۳ - مطالعه موردی

۳ - معرفی سیستم مورد مطالعه

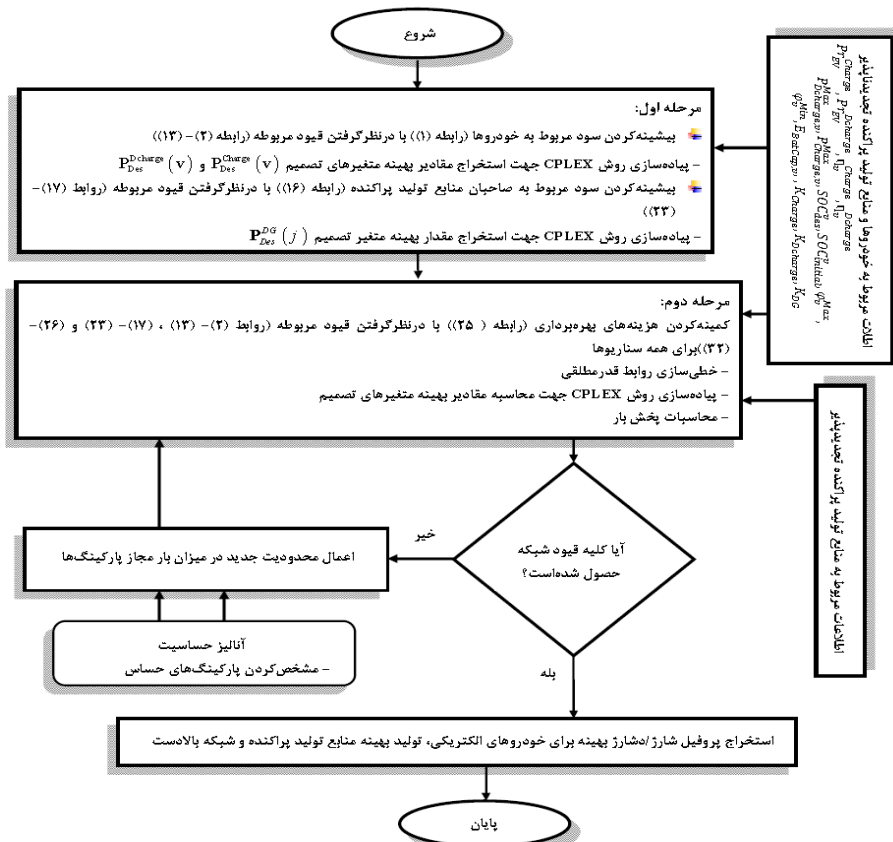
چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع متصل شده به باس ۵ از شبکه نمونه RBTS^۶ که دارای ۴ فیدر در ولتاژ ۲۰kV می‌باشد، آزمایش شده است [۳۴]. برای این شبکه، داده‌های مربوط به نوع و تعداد مشترکان متصل به نقاط بار مختلف، مقدار متوسط بار هر کدام از آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. این شبکه به همراه تقسیم‌بندی نواحی مربوط به هماهنگ‌کننده‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. محدودیت ولتاژ شین‌ها برابر با ۰/۹-۱/۰۵ پرونیت در نظر گرفته شده است. قیمت ساعتی بازار برق در جدول (۲) آورده شده است [۳۵]. ظرفیت ترانسفورماتورهای فشار متوسط و فشار ضعیف شبکه به ترتیب MVA 1 و MVA 15 در نظر گرفته شده است. در این شبکه چهار هماهنگ‌کننده با نام‌های A1، A2، A3 و A4 در نظر گرفته شده است. بار ساعتی پیش‌بینی شده هر یک از هماهنگ‌کننده‌ها در بازه برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته در شکل (۳) نشان داده شده است.

شبکه و استراتژی اصلاحی شارژ/دشارژ مربوط به خودروها را تعیین کند. از آنجایی که مرحله دوم بهینه‌سازی دارای جملات غیرخطی (جملات قدرمطلق در رابطه (۲۵)) می‌باشد هیچ تضمینی جهت استخراج جواب بهینه مطلق وجود ندارد. از این رو در ابتدا این روابط به شکل زیر خطی‌سازی می‌شوند [۳۳]:

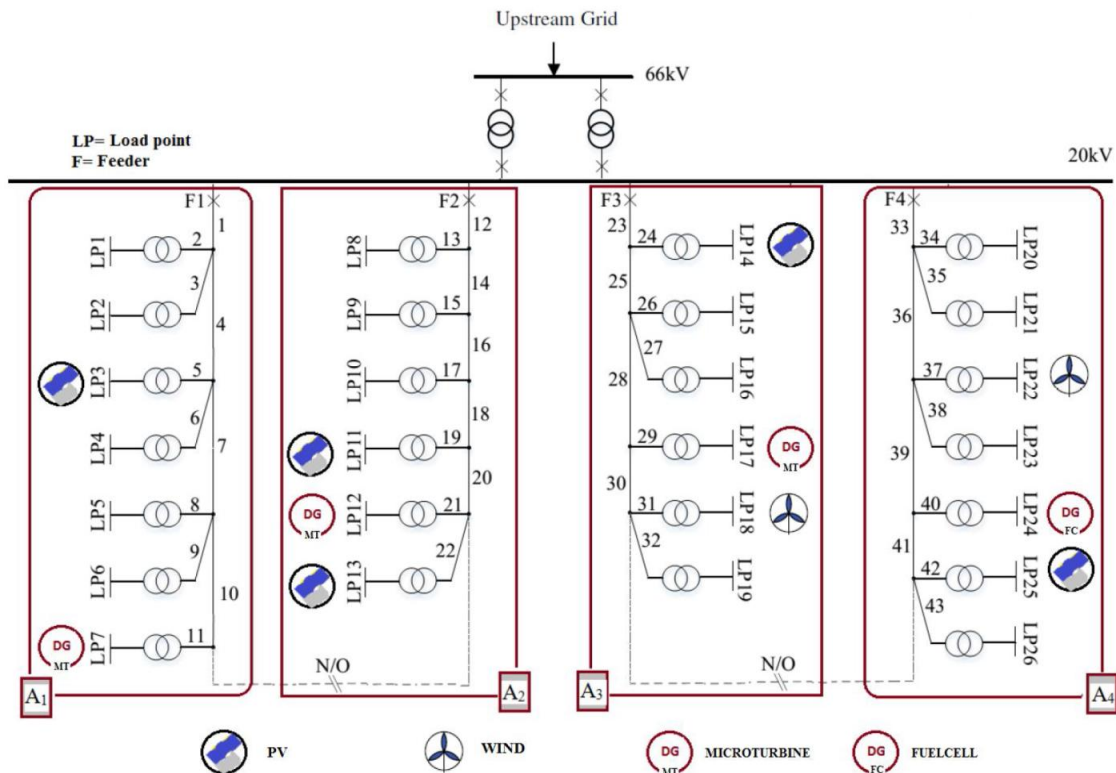
با فرض این که دو متغیر γ و ε مثبت باشند:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } |f(x)| &\rightarrow \text{Minimize } \gamma + \varepsilon \\ f(x) &= \gamma - \varepsilon \\ \gamma, \varepsilon &\geq 0 \end{aligned}$$

در نهایت بهره‌بردار شبکه با اجرای پخش بار قیود فنی شبکه (رابطه (۲۹)-(۳۲)) را چک می‌کند. در صورتی که هر یک از قیود تأمین نشوند با اعمال محدودیت در میزان بار مربوط به پارکینگ‌های حساس (شین‌های حساس) تا حصول کامل قیود، مرحله دوم برنامه‌ریزی تکرار می‌شود. لازم به ذکر است جهت تعیین پارکینگ‌های حساس از آنالیز حساسیت استفاده شده است یعنی برای هر بازه زمانی برای هر پارکینگ میزان بار پارکینگ ۱۰٪ افزایش یافته و تغییرات مربوط به ولتاژ پارکینگ‌ها ذخیره شده است. پس از اعمال این الگوریتم پارکینگ‌های حساس در هر بازه زمانی شناسایی می‌شوند.



شکل ۱: فلوچارت برنامه‌ریزی انرژی پیشنهادی



شکل ۲: نمودار تک‌خطی شبکه توزیع متصل شده به باس ۵ از شبکه نمونه RBTS

شبکه نصب شده است. مشخصات توابع هزینه هر یک از واحدها در جدول (۳) آورده شده است. حداکثر نرخ افزایش و کاهش توان مربوط به هر یک از واحدها در هر بازه زمانی برابر با ۲۰ درصد حداکثر ظرفیت آن‌ها در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: مشخصات واحدهای تولید پراکنده تجدیدناپذیر

Gen type	a(\$)	b(\$/kW)	P_{DG}^{Min} (kW)	P_{DG}^{Max} (kW)
MT	۲۰	۰٫۲	۵۰	۳۵۰
MT	۴۰	۰٫۳	۵۰	۲۵۰
MT	۲۰	۰٫۲	۵۰	۳۵۰
FC	۹۰	۰٫۳۵	۵۰	۲۵۰

الگوی استفاده از خودروها با توجه به یک مطالعه آماری در شهر تهران به دست آمده است. اطلاعات به دست آمده شامل ساعات ورود و خروج خودروها، میزان انرژی اولیه هنگام ورود به پارکینگ‌ها و سایر اطلاعات مربوط به خودروها می‌باشد. خلاصه‌ای از اطلاعات الگوی رفتاری صاحبان خودروها در استفاده از وسیله نقلیه خود در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: اطلاعات آماری خودروهای الکتریکی

Type	Arrival time(H)	Departure time(H)	$I \square [0.1, 0.5]$
خانگی	Norm \square (19,5)	Norm \square (7,2)	$I \square [0.1, 0.5]$
اداری	Norm \square (7,1)	Norm \square (15,1)	$I \square [0.5, 0.8]$
تجاری	Norm \square (9,2)	Norm \square (20,2)	$I \square [0.3, 0.6]$

جدول ۱: نوع و مقدار متوسط بار و تعداد مشترکان نقاط بار مختلف در شبکه

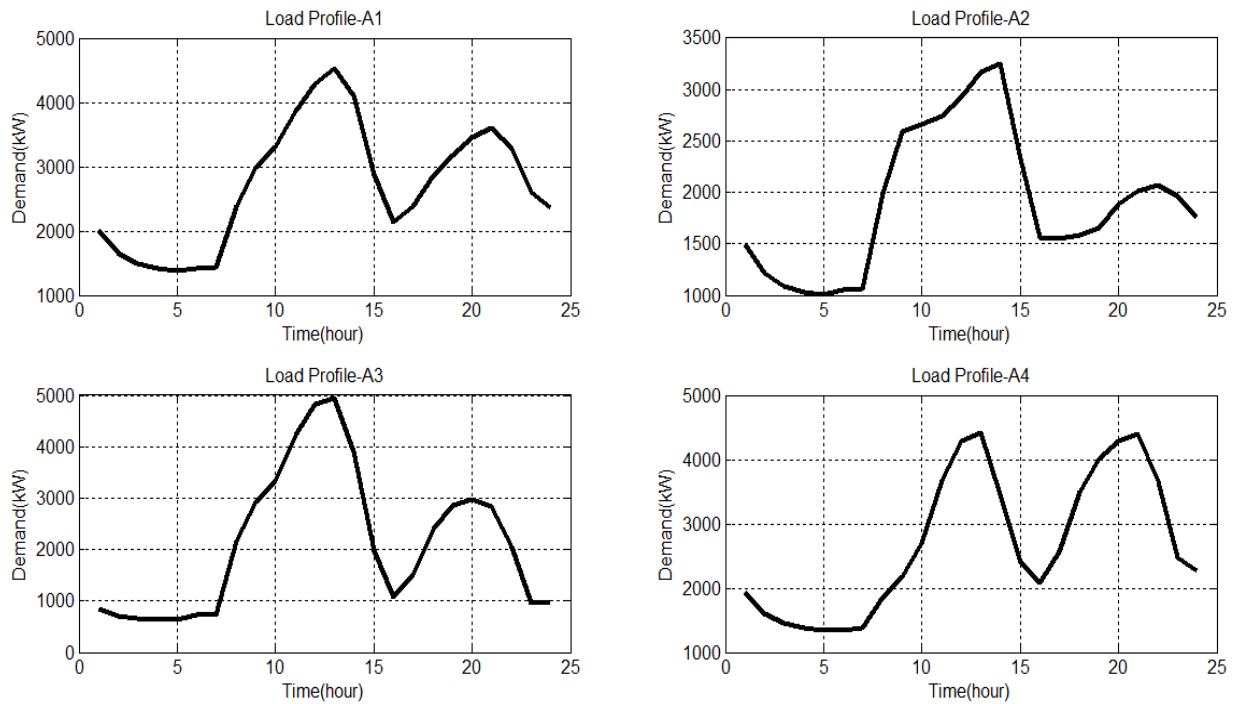
توزیع تحت مطالعه

نقاط بار	نوع مشترکان	متوسط بار (MW)	تعداد مشترکان
۲۱-۲۰-۲-۱	مسکونی	۰٫۴۲۶۹	۲۱۰
۲۳-۱۷-۸-۵-۳	اداری	۰٫۶۲۴۶	۱
۲۵-۱۵-۶-۴	مسکونی	۰٫۴۱۷۱	۲۴۰
۲۴-۲۲-۱۸-۱۴-۷	تجاری	۰٫۴۰۸۹	۱
۲۶-۱۳-۱۱-۱۰-۹	مسکونی	۰٫۳۲۱۳	۱۹۵
۱۹-۱۶-۱۲	اداری	۰٫۳۷۸۶	۱

جدول ۲: قیمت ساعتی بازار برق

ساعت	قیمت (\$/kWh)	ساعت	قیمت (\$/kWh)
۱	۰٫۰۳۳	۱۳	۰٫۲۱۵
۲	۰٫۰۲۷	۱۴	۰٫۵۷۲
۳	۰٫۰۲	۱۵	۰٫۲۸۶
۴	۰٫۰۱۷	۱۶	۰٫۲۷۹
۵	۰٫۰۱۷	۱۷	۰٫۰۸۶
۶	۰٫۰۲۹	۱۸	۰٫۰۵۹
۷	۰٫۰۳۳	۱۹	۰٫۰۵
۸	۰٫۰۵۴	۲۰	۰٫۰۶۱
۹	۰٫۲۱۵	۲۱	۰٫۱۸۱
۱۰	۰٫۵۷۲	۲۲	۰٫۰۷۷
۱۱	۰٫۵۷۲	۲۳	۰٫۰۴۳
۱۲	۰٫۵۷۲	۲۴	۰٫۰۳۷

همچنین ۳ واحد میکروتوربین و یک واحد پیل سوختی در این



شکل ۳: تقاضای بار ساعتی هماهنگ‌کننده‌ها

سوئیچینگ مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است برای خودروهای تحت مطالعه سن باتری آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده است.

جدول ۶: تعداد دفعات سوئیچینگ مجاز باتری خودروها با توجه به سن آن‌ها

سن باتری	$AOB \geq 8$	$6 \leq AOB < 8$	$4 \leq AOB < 6$	$AOB < 4$
NS^{Max}	۲	۴	۶	۸

در این مطالعه فرض شده است که تمامی توربین‌های بادی نصب‌شده در شبکه از یک مدل بوده و مشخصات آن‌ها مطابق جدول (۷) می‌باشد [۲۸].

جدول ۷: اطلاعات توربین‌های بادی

V_{co} (m/s)	V_r (m/s)	V_{ci} (m/s)	P_{rated} (kW)
۳۰	۱۲	۳	۵۰۰

همچنین سیستم‌های فتوولتائیک با توان ۱۰۰ کیلووات (۱۰ پنل ۱۰ kW) در سطح شبکه نصب‌شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول (۸) آورده شده است [۲۶]. در کلیه مطالعات فرض شده است که سیستم فتوولتائیک و توربین‌های بادی در ضریب توان واحد بهره‌برداری می‌شوند.

جدول ۸: اطلاعات سیستم فتوولتائیک

η (%)	S (m ²)	T_a (°C)
۱۸,۶	۱۰	۲۵

به‌منظور محاسبه تعداد کل خودروها، اولین قدم دانستن تعداد مشترکان مسکونی تحت پوشش شبکه می‌باشد. در این راستا از اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۱) استفاده‌شده و در نهایت به‌ازاء ۳۵ درصد نفوذ، تعداد کل خودروهای موجود در شبکه ۴۰۰۴ خودرو برآورد شده است. برای انجام مطالعات، علاوه بر تعداد خودروها، کلاس آن‌ها نیز مطابق مرجع [۳۶] در نظر گرفته شده است.

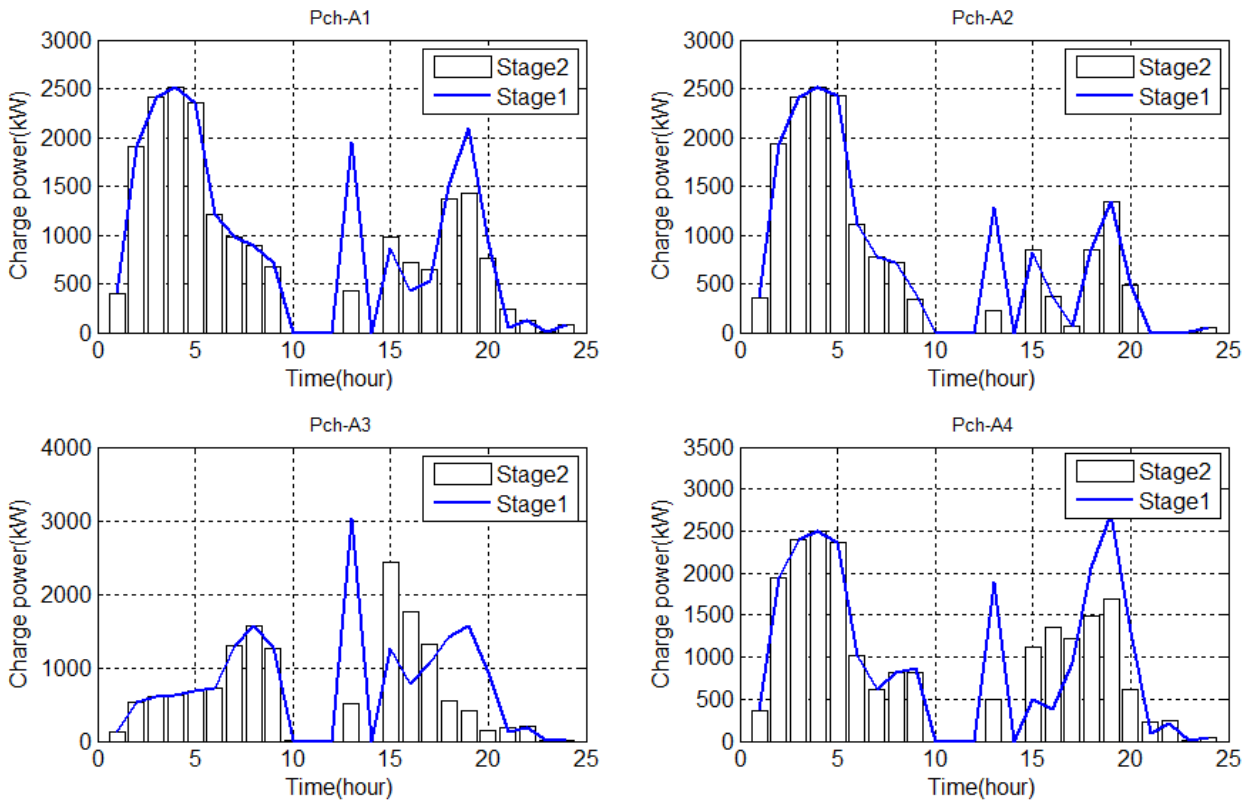
ظرفیت باتری یکی از ویژگی‌های مهم خودروها می‌باشد. مطابق با مرجع [۳۶] محدوده ظرفیت باتری در هر کلاس به صورت جدول (۵) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است جهت توزیع ظرفیت باتری‌ها در هر کلاس از توزیع یکنواخت استفاده شده است.

جدول ۵: محدوده ظرفیت باتری برای هر کلاس

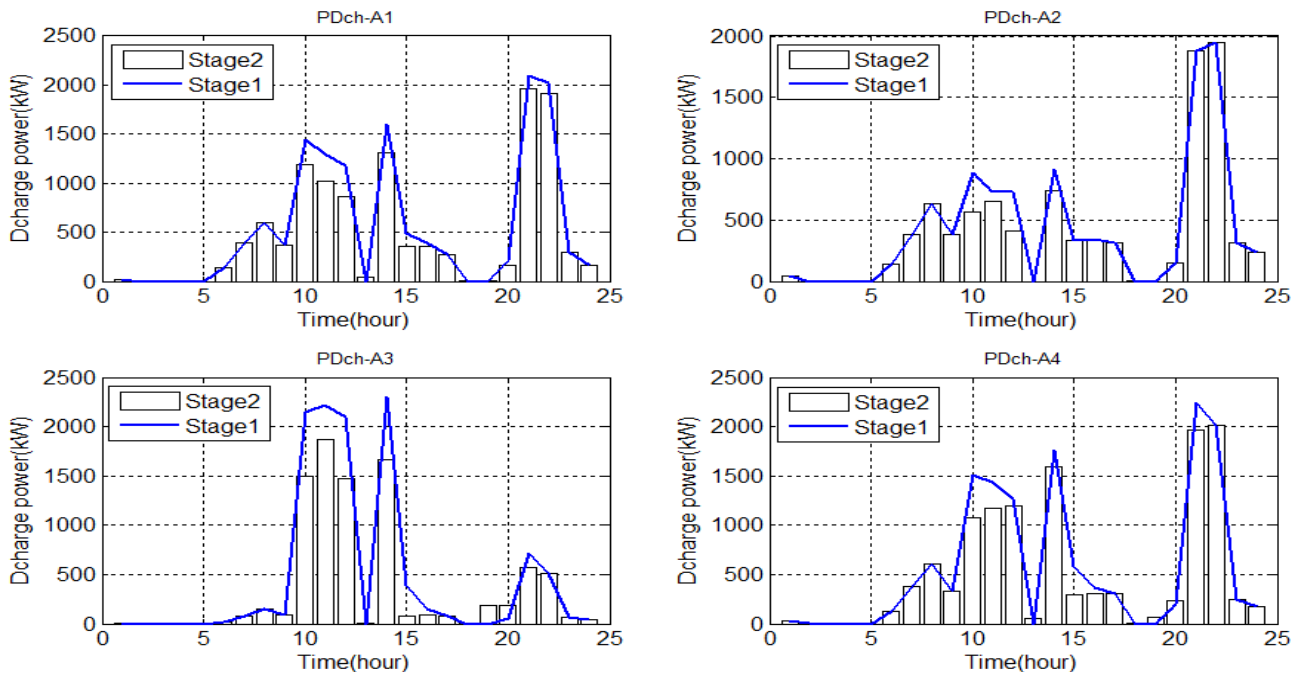
کلاس	حداقل ظرفیت (kWh)	حداکثر ظرفیت (kWh)
۱	۸	۱۲
۲	۱۰	۱۴
۳	۱۷	۲۱
۴	۱۹	۲۴

حداکثر نرخ شارژ و دشارژ خودروها ۴ kWh و ضرایب وزنی شارژ و دشارژ برابر با ۶۰٪ قیمت پیک بازار در نظر گرفته شده است. معمولاً مقداری انرژی در فرآیند شارژ و دشارژ باتری خودروها تلف می‌شود از این رو ضریب بازده شارژ و دشارژ خودروها ۹۰٪ و ۹۵٪ در نظر گرفته شده است [۲۶].

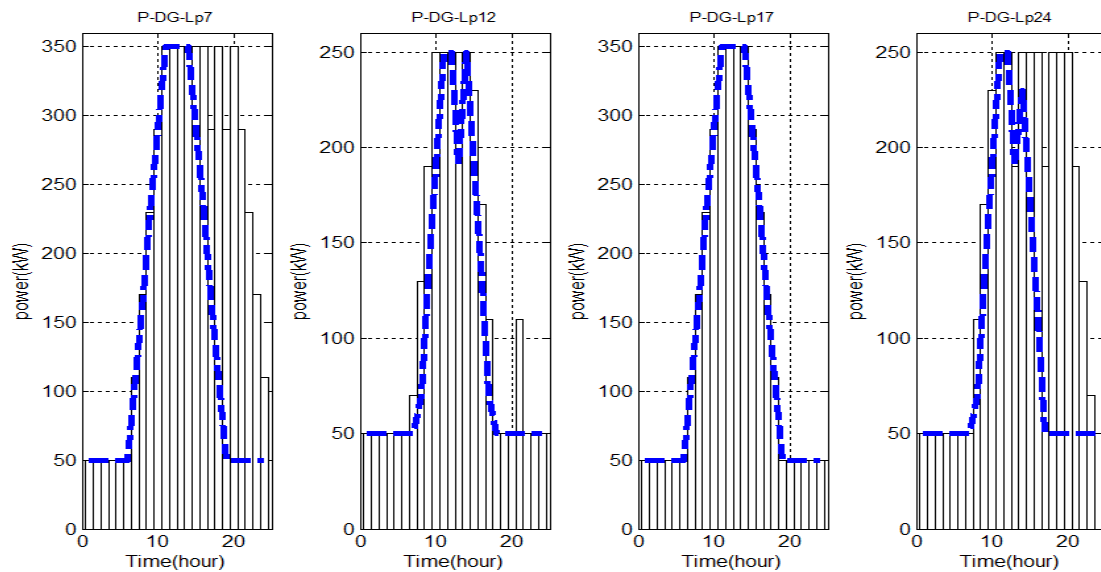
همچنین به‌منظور جلوگیری از پیری زودرس باتری خودروها، تخلیه باتری تا میزان ۸۵٪ اجازه داده‌شده و تعداد دفعات مجاز



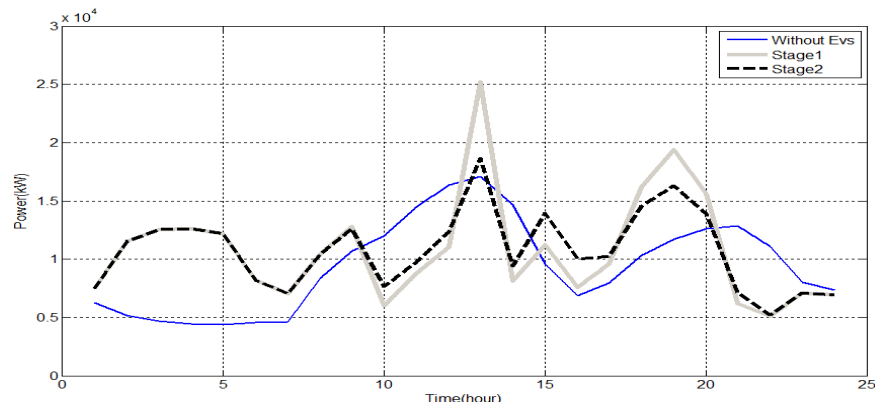
شکل ۴: پروفیل شارژ خودروهای الکتریکی نواحی مختلف پس از اعمال الگوریتم دومرحله‌ای پیشنهادی



شکل ۵: پروفیل دشارژ خودروهای الکتریکی نواحی مختلف پس از اعمال الگوریتم دومرحله‌ای پیشنهادی



شکل ۶: توان تولیدی هر یک از منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر (مرحله اول - مرحله دوم)



شکل ۷: پروفیل بار شبکه برای سه وضعیت مختلف بهره‌برداری

۳-۴ نتایج شبیه‌سازی

نتایج برنامه‌ریزی صورت گرفته در هر دو مرحله برنامه‌ریزی پیشنهادی در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که شارژ اغلب خودروها در ساعات کم‌باری شبکه (۱-۷ صبح) صورت گرفته، چراکه در این ساعات قیمت بازار برق پایین بوده است. همچنین دشارژ خودروها در ساعات پرباری شبکه باعث کاهش پیک بار شبکه و تأمین قیود فنی شبکه شده است. لازم به‌ذکر است با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) بیشترین هزینه پرداختی به خودروها جهت مشارکت در ساعات پیک بوده است. شکل (۶) توان برنامه‌ریزی شده منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر برای دو مرحله الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. (منحنی خط‌چین نشان‌دهنده مرحله اول الگوریتم پیشنهادی و منحنی بارشکل مربوط به مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی می‌باشد). همان‌گونه که مشخص است منابع تجدیدناپذیر در ساعات پرباری شبکه با توجه به قیمت بالای بازار انرژی حداکثر توان خود را تولید

جهت تولید سناریو برای هر بازه برنامه‌ریزی، تابع توزیع سرعت باد و تابش خورشید، هرکدام به پنج بازه تقسیم شده‌اند تا این توابع از حالت پیوسته به حالت گسسته تبدیل شوند. به‌منظور کاهش زمان اجرا و پیچیدگی برنامه ابتدا تعداد سناریوها را به کمک تکنیک کاهش سناریو عقب‌گرد [۳۷] کاهش داده و سپس سناریوهای توان باد و خورشید را با هم ترکیب کرده تا سناریوهای نهایی به‌دست آیند. در این مطالعه تعداد سناریوهای نهایی ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است.

۳-۴ روند شبیه‌سازی

روش برنامه‌ریزی پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS، *OpenDSS* و *MATLAB* کدنویسی شده است. مرحله اول و دوم این برنامه‌ریزی به‌صورت خطی پیاده‌سازی و جهت حل مسئله از روش محاسباتی CPLEX استفاده شده است.

برای سناریوهای مختلف به کار گرفته شد. در نهایت همان گونه که نتایج نشان می‌دهند استفاده از مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی علاوه بر رضایتمندی بالای خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده می‌تواند از یک طرف باعث حداقل شدن هزینه‌های بهره‌برداری و از طرف دیگر باعث کاهش و به تعویق افتادن هزینه‌های تقویت شبکه شود.

سیاسگزاری

با تشکر از شرکت برق منطقه‌ای کرمان که در به‌ثمر رسیدن این پژوهش نقش داشته‌اند.

مراجع

- [1] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rastegar, "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1351-1360, 2013.
- [2] P.H. Divshali, B.J. Choi, "Electrical market management considering power system constraints in smart distribution grids," Energies, vol. 9, 2016.
- [3] P. Papadopoulos, N. Jenkins, L. M. Cipcigan, I. Grau, and E. Zabala, "Coordination of the Charging of Electric Vehicles Using a Multi-Agent System," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1802-1809, 2013.
- [4] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid," Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 185-192, 2011.
- [5] A. S. Masoum, S. Deilami, A. Abu-Siada, and M. A. S. Masoum, "Fuzzy Approach for Online Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grid," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, pp. 1112-1121, 2015.
- [6] Scott, M.J., et al., Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids: Part 2: economic assessment. Pacific Northwest National Laboratory (a), 2007.
- [7] B. Falahati, Y. Fu, Z. Darabi, and L. Wu, "Reliability assessment of power systems considering the large-scale PHEV integration," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, 2011.
- [8] مهدی تورانی، محمدرضا آقاابراهیمی و حمیدرضا نجفی، "برنامه ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه بر پایه مسافرت روزانه خودروها"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، زمستان ۹۵.
- [9] مهدی تورانی، محمدرضا آقاابراهیمی و حمیدرضا نجفی، "برنامه ریزی محدوده پارکینگ خودروهای الکتریکی و شارژ و دشارژ آن به منظور بهبود قابلیت اطمینان در شبکه‌های هوشمند"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، تابستان ۹۶.
- [10] H. Farzin, M. Moeini-Aghtaie, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability Studies of Distribution Systems Integrated With Electric Vehicles Under Battery-Exchange Mode," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, pp. 2473-2482, 2016.
- [11] J. Kiviluoma and P. Meibom, "Methodology for modelling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles," Energy, vol. 36, pp. 1758-1767, 2011.

می‌کنند و در ساعات کم‌باری با توجه به قیمت پایین بازار برق حداقل توان خود را تولید و بار موجود توسط شبکه بالادست تأمین می‌گردد. شکل (۷) پروفیل بار شبکه را برای سه وضعیت مختلف بهره‌برداری شبکه نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص می‌باشد حضور خودروهای الکتریکی به‌عنوان یک بار جدید باعث تغییر شکل پروفیل بار شبکه شده است (منحنی خاکستری‌رنگ - خودروها باعث افزایش حدود ۶ مگاواتی پیک بار شبکه شده‌اند). اعمال چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی باعث شده میزان بار الکتریکی شبکه در ساعات پیک افزایش چندانی پیدا نکند (منحنی خط چین). به بیان دیگر، منحنی تقاضای انرژی الکتریکی شبکه توزیع در ساعات اوج کاهش و در ساعات کم‌باری افزایش یافته است که این امر باعث یکنواخت‌تر شدن منحنی پروفیل بار شبکه شده است.

در ادامه جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی مطالعات برای حالتی که خودروها و منابع تولید پراکنده در طرح پیشنهادی شرکت نکنند انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که شبکه موجود جوابگوی تأمین بار مورد نیاز خودروها نمی‌باشد (پیک بار شبکه تقریباً ۷ مگاوات افزایش یافته است) و نیاز به تقویت شبکه می‌باشد.

از این رو جهت مقایسه، هزینه‌های مربوط به یک سال اجرای طرح پیشنهادی با هزینه‌های مربوط به طرح تقویت شبکه مقایسه گردید. طرح تقویت شبکه بدین صورت انجام شده است که مطالعات مربوط به طرح تقویت شبکه با نفوذ ۳۵ درصدی خودروها برای افق ۲۰ ساله انجام و هزینه‌های مربوطه به دست آمد. در نهایت جهت مقایسه، هزینه‌های تقویت شبکه با در نظر گرفتن نرخ بهره ۱۰ درصد برای یک سال معادل‌سازی و به دست آمد. جدول (۹) هزینه‌های به دست آمده پس از اجرای دو طرح را نشان می‌دهد همان گونه که مشخص می‌باشد افزایش هزینه‌های تقویت شبکه بیش از ۵ برابر افزایش هزینه‌های اجرای طرح پیشنهادی می‌باشد.

جدول ۹: افزایش هزینه‌ها

طرح	افزایش هزینه سالیانه اجرای طرح پیشنهادی (\$)
طرح پیشنهادی	۱۶۰۱۹۴۱
طرح تقویت شبکه	۹۰۵۸۲۰۷

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله یک چهارچوب برنامه‌ریزی دومرحله‌ای جهت مدیریت بهینه خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده با مالکیت خصوصی به صورت متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد اساسی در این مقاله برنامه‌ریزی بهینه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در کنار منابع تولید پراکنده با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری با در نظر گرفتن خواسته صاحبان خودرو و منابع تولید پراکنده بود. جهت پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در ابتدا خودروهای الکتریکی به صورت احتمالاتی مدل شده و عدم قطعیت مربوط به منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در نظر گرفته شد، سپس جهت حل مسئله روش بهینه‌سازی CPLEX

- Considering Uncertainties in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 29, pp. 259-270, 2014.
- [25] T. Wu, Q. Yang, Z. Bao, and W. Yan, "Coordinated Energy Dispatching in Microgrid With Wind Power Generation and Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, pp. 1453-1463, 2013.
- [26] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Integrated operation of electric vehicles and renewable generation in a smart distribution system." *Energy Conversion and Management*, vol. 89 pp. 99-110, 2015.
- [27] M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, "Optimized Probabilistic PHEVs Demand Management in the Context of Energy Hubs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, pp. 996-1006, 2015.
- [28] M. Honarmand, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 745-755, 2014.
- [29] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 360-370, 2010.
- [30] A. Yona, T. Senjyu, and T. Funabashi, "Application of Recurrent Neural Network to Short-Term-Ahead Generating Power Forecasting for Photovoltaic System," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6, 2007.
- [31] G. Boyle, *Renewable energy*, Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2004.
- [32] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, pp. 482-488, 1994.
- [33] D. Bertsimas and J. N. Tsitsiklis, "Introduction to Linear Optimization," 1997.
- [34] R. Billinton and S. Jonnavithula, "A test system for teaching overall power system reliability assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 1670-1676, 1996.
- [35] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, and G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, pp. 258-267, 2011.
- [36] S. W. Hadley and A. A. Tsvetkova, "Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation," *The Electricity Journal*, vol. 22, pp. 56-68, 2009.
- [37] N. M. M. Razali and A. H. Hashim, "Backward reduction application for minimizing wind power scenarios in stochastic programming," *International Power Engineering and Optimization Conference*, pp. 430-434, 2010.
- [12] H. Turton and F. Moura, "Vehicle-to-grid systems for sustainable development: An integrated energy analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 75, pp. 1091-1108, 2008.
- [13] K. Clement-Nyns, 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, 2010.
- [14] C. Pang, M. Kezunovic and M. Ehsani, "Demand side management by using electric vehicles as distributed energy resources," *Proc. of IEEE Electric Vehicle Conf. (IEVC)*, Greenville, SC, March 2012.
- [15] Nafisi, H., H. Askarian Abyaneh, and M. Abedi, Energy loss minimization using PHEVs as distributed active and reactive power resources: a convex quadratic local optimal solution. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015.
- [16] H. Nafisi, S. M. M. Agah, H. A. Abyaneh, and M. Abedi, "Two-Stage Optimization Method for Energy Loss Minimization in Microgrid Based on Smart Power Management Scheme of PHEVs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 1268-1276, 2016.
- [17] Q. D. Van, J. H. Bae, J. D. Lee, and S. J. Lee, "Monitoring of Power Allocation in Centralized Electric Vehicle Charging Spot System," *Journal of Energy Procedia*, vol. 17, pp. 1542-1549, 2012.
- [18] O. Sundstrom, and C. Binding, "Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 26-37, March 2012.
- [19] Z. Luo, Z. Hu, and et al, "Optimal Coordination of Plug-In Electric Vehicles in Power Grids With Cost-Benefit Analysis—Part I: Enabling Techniques," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3546-3555, Nov. 2013.
- [20] Z. Luo, Z. Hu, and et al, "Optimal Coordination of Plug-In Electric Vehicles in Power Grids With Cost-Benefit Analysis —Part II: A Case Study in China," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3556-3565, Nov. 2013.
- [21] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy, and J. Y. Yong, "Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 720-732, 2016.
- [22] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "Effective Utilization of Available PEV Battery Capacity for Mitigation of Solar PV Impact and Grid Support With Integrated V2G Functionality," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 1562-1571, 2016.
- [23] P. Kou, D. Liang, L. Gao, and F. Gao, "Stochastic Coordination of Plug-In Electric Vehicles and Wind Turbines in Microgrid: A Model Predictive Control Approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 1537-1551, 2016.
- [24] M. F. Shaaban, and E. F. El-Saadany, "Accommodating High Penetrations of PEVs and Renewable DG

زیرنویس‌ها

¹ Online² Vehicle to Grid³ Aggregator⁴ State of Charge⁵ Rayleigh⁶ Roy Billinton Test System