

## **Active and Reactive Power Management of Smart Distribution Network Using Electric Vehicles as Mixed Integer Linear Programming Problem**

**Sasan Pirouzi<sup>1</sup>, Jamshid Aghaei<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD Student, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

<sup>2</sup> Associate Prof., Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

### **Abstract:**

Electric vehicles (EVs) are new and growing loads in distribution networks. Increasing number of electric vehicles in a distribution network causes increase of electricity energy demand. Therefore, in the absence of any energy consumption management, some distribution system operation constraints (e.g. bus voltage magnitude) may be violated. Power electronic devices used for charging and discharging the batteries, are usually called chargers. The charger could be unidirectional (transfer the energy from network to the battery) or bidirectional. Bidirectional chargers work in four areas of PQ power plane. In this paper, firstly, the active and reactive power management of smart distribution network using electric vehicles as non-linear problem is presented. Then, the problem is converted to mixed integer linear programming (MILP) problem using specific linearization method and is solved by GAMS package. The proposed scheme has been tested on the 33-bus distribution network and its performance and capability have been evaluated by simulation results.

**Keywords:** Electric Vehicles, Smart distribution network, Active and reactive power management, Mixed integer linear programming problem.

## مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی به صورت مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح

ساسان پیروزی<sup>۱</sup>، جمشید آقایی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران

s.pirouzi@sutech.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران

aghaei@sutech.ac.ir

**چکیده:** خودروهای الکتریکی (EVs) از جمله بارهای جدید روبه رشد در شبکه‌های توزیع هستند. افزایش تعداد خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع به افزایش تقاضای انرژی شبکه منجر می‌شود. در صورت نبود مدیریت بر الگوی دریافت انرژی آنها از شبکه، ممکن است ولتاژ باس‌ها و بارگذاری خطوط از محدوده مجاز خود خارج شوند. همچنین برای شارژ و دشارژ کردن باتری خودروها در زمان اتصال به شبکه، از ادوات الکترونیک قدرت با عنوان شارژر استفاده می‌شود. شارژر به صورت یک طرفه و دوطرفه قادرند انرژی را بین شبکه و باتری رد و بدل کنند. مدل دوطرفه قادر است در چهار ناحیه کاری مختصات PQ فعالیت کند. بنابراین در این مقاله مدیریت توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی به صورت بهینه‌سازی غیرخطی مدل می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های خاص خطی‌سازی معادلات غیرخطی، مسئله یادشده به صورت مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) مدل می‌شود تا امکان دستیابی به بهینه‌سازی مطلق با استفاده از موتور حل مرسوم GAMS فراهم شود. این مسئله بر روی شبکه تست ۳۳ باسه اجرا شده است و نتایج عددی نشان‌دهنده توانمندی روش ارائه شده برای مدیریت توان اکتیو و راکتیو بهینه هستند.

**واژه‌های کلیدی:** خودروهای الکتریکی، شبکه توزیع هوشمند، مدیریت توان اکتیو و راکتیو، مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح

### ۱- مقدمه

توسعه بسیار زیادی پیدا می‌کند؛ به طوری که طبق گزارش وزارت انرژی ایالات متحده<sup>۱</sup> (DOE)، فروش سالانه خودروهای الکتریکی هیبریدی متصل به شبکه<sup>۲</sup> (PHEV) در سال ۲۰۳۵ به بیش از ۳۰۰ هزار خودرو در سال خواهد رسید [۱، ۲]. خودروی الکتریکی انواع مختلفی دارد؛ از جمله، PHEV، خودروی الکتریکی هیبریدی<sup>۳</sup> (HEV) و خودروی الکتریکی تماماً باتری<sup>۴</sup> (BEV). این خودروها برای شارژ باتری خود به منابع انرژی مختلفی نیاز دارند. در برخی انواع خودروهای الکتریکی مانند PHEV برای شارژ باتری از شبکه برق استفاده می‌شود. برای شارژ باتری با استفاده از شبکه، واسطی بین آنها به نام شارژر قرار می‌گیرد که وظیفه اصلی آن، تبدیل برق جریان متناوب شبکه به برق

به دلیل آثار منفی زیست‌محیطی ناشی از مصرف کنترل‌نشده انرژی، استفاده از فناوری‌های کمک‌کننده به رفع این آثار منفی، روبه‌روز در حال پیشرفت است. پیش‌بینی می‌شود استفاده از خودروهای الکتریکی یکی از فناوری‌های کمک‌کننده است که برای کاهش آلودگی در آینده نزدیک

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸

نام نویسنده مسئول: جمشید آقایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - خیابان مدرس - دانشگاه

صنعتی شیراز - دانشکده برق و الکترونیک

به شبکه و اتمام آن بعد از مدت شارژ مخصوص باتری) در شبکه عموم مقالات به مدیریت شارژر یا مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی اشاره کرده‌اند [۱۱-۱۴]. برای مثال در [۱۵]، مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی به منظور کمینه کردن تلفات شبکه با برقراری قیود مرتبط با شبکه و خودروهای الکتریکی صورت گرفته است. براساس نتایج مرجع مذکور، خودروهای الکتریکی برای کاهش تلفات در ساعت‌های کم‌باری از شبکه انرژی دریافت می‌کنند. این امر افزایش ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی (نسبت تعداد خودروهای الکتریکی که توانسته‌اند از شبکه انرژی دریافت کنند، به تعداد کل خودروهای الکتریکی که خواستار دریافت انرژی از شبکه هستند) در شبکه را موجب می‌شود؛ ولی در این صورت، خودروهای الکتریکی در بهبود شاخص‌های شبکه مانند ولتاژ برای لحظات بحرانی مانند پیک بار مؤثر واقع نمی‌شوند. برای این منظور [۱۶] علاوه بر مدیریت شارژ، مدیریت دشارژ باتری را نیز در نظر گرفته است. براساس نتایج مرجع ذکر شده، در صورتی که خودروهای الکتریکی در لحظه اتصال به شبکه، مقداری انرژی اولیه در باتری خود دارند، بنابراین خودروهای الکتریکی با تزریق توان به شبکه در لحظات پیک بار، بهبود شاخص‌های شبکه در این لحظات را موجب می‌شوند. در مراجع [۱۷-۲۰]، علاوه بر حضور خودروهای الکتریکی در شبکه، از منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر مانند منابع تولید بادی و منابع تولید خورشیدی نیز استفاده شده است. در [۱۷] از منابع تولید خورشیدی، خودروهای الکتریکی و خازن‌های موازی در شبکه استفاده شده است. بنابراین قیود مسئله بهینه‌سازی شامل روابط مربوط پخش توان، قیود منابع تولید خورشیدی، قیود خودروهای الکتریکی و خازن‌های موازی هستند. در این مرجع از کمینه‌سازی انحراف ولتاژ به‌عنوان تابع هدف استفاده شده است. براساس نتایج مرجع مذکور، حضور منابع تولید خورشیدی موجب افزایش ولتاژ بیش از حد مجاز آن می‌شود؛ بنابراین در این صورت، دریافت انرژی خودروهای الکتریکی از منابع تولید خورشیدی، تنظیم ولتاژ شبکه، کاهش تلفات شبکه و آزادسازی خطوط انتقال را موجب می‌شود. شایان ذکر است استفاده از منابع تولید خورشیدی در شبکه، کاهش تقاضا

جریان مستقیم برای شارژ باتری است. شارژر علاوه بر تأمین برق مورد نیاز باتری، به کنترل توان تحویلی به شبکه هم قادر است که در برخی از انواع شارژرها، تنها توان اکتیو بین شبکه و باتری کنترل می‌شود و در دیگر انواع شارژرها، توان اکتیو و راکتیو در دو جهت شبکه به شارژر و شارژر به شبکه کنترل می‌شوند؛ بنابراین شارژر نقش مهمی در بخش کنترل توان بین شبکه و باتری ایفا می‌کند؛ بنابراین این قابلیت وجود دارد که به کمک آنها توان اکتیو و راکتیو در سطح شبکه مدیریت شوند [۳].

شارژرهایی که امروزه به‌طور معمول در خودروهای الکتریکی استفاده می‌شوند، ساختار یک‌طرفه انتقال توان اکتیو دارند؛ یعنی تنها توان اکتیو تحویلی شبکه به باتری را کنترل می‌کند. علاوه بر این موضوع، توان راکتیو این شارژرها تقریباً برابر صفر است [۳]. خودروهای الکتریکی عموماً و به‌طور تصادفی از ساعت ۱۶:۰۰ تا ۲۴:۰۰ به شبکه اتصال می‌یابند که اوج اتصال این خودروها به شبکه بین ساعت‌های ۱۷:۰۰ تا ۲۰:۰۰ است. همچنین قطع اتصال خودروهای الکتریکی از شبکه بین ساعت‌های ۵:۰۰ تا ۹:۰۰ است [۴]. امروزه خودروها با اتصال به شبکه، بعد از یک مدت زمان شارژ مشخص به شارژ کامل می‌رسند و در لحظه‌های دیگر حضورشان در شبکه، از شبکه توانی دریافت نمی‌کنند [۵، ۶]. همچنین در حال حاضر در شبکه‌های توزیع، بستری هوشمند برای ارتباط خودروها و شبکه وجود ندارد که دو عامل یاد شده ازدیاد تقاضای انرژی در بازه زمانی پربار شبکه را موجب می‌شوند [۷]. افزایش تقاضای انرژی موجب افزایش تلفات شبکه، کاهش ولتاژ باس‌ها و همچنین احتمالاً به پرشدگی خطوط توزیع و انتقال منجر می‌شود [۸، ۹]. محدوده مجاز عوامل ذکر شده باعث می‌شود تعداد خودروهای متصل به شبکه به‌صورت هم‌زمان محدود شوند؛ بنابراین در آینده با افزایش تعداد خودروها، با ساختار شبکه امروزی و نحوه استفاده خودروها از شبکه به شیوه امروزی، چاره‌ای جز محدود کردن تعداد خودروها برای اتصال به شبکه وجود نخواهد داشت [۱۰].

برای رفع مشکلات ناشی از نبود مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی (آغاز عملیات شارژ به محض اتصال

در ادامه مقاله، ساختار خودروی الکتریکی از دید شبکه در بخش دوم ارائه می‌شود. در بخش ۳، روش خطی‌سازی، مدل مسئله غیرخطی و خطی بیان می‌شود. نتایج عددی در بخش چهارم و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ذکر می‌شوند.

## ۲- ساختار خودروی الکتریکی از دید شبکه

خودروی الکتریکی از دید شبکه به صورت بار فعال بیان می‌شود؛ زیرا این بار جدید از شبکه توان اکتیو و راکتیو، دریافت و یا توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق می‌کند. شایان ذکر است زمانی که، خودروی الکتریکی به شبکه متصل می‌شود، توان ارسالی شبکه به خودروی الکتریکی برای شارژ باتری آن استفاده می‌شود. این توان ارسالی با عبور از شارژر خودروی الکتریکی به باتری وارد می‌شود. پس ساختار خودروی الکتریکی از دید شبکه به دو عنصر باتری و شارژر خلاصه می‌شود. باتری وظیفه ذخیره انرژی دریافتی از شبکه را دارد که در صورت مسافرت خودروی الکتریکی از این انرژی استفاده شود. شارژر نیز به عنوان مدل برق جریان متناوب شبکه به برق جریان مستقیم مورد نیاز باتری عمل می‌کند [۲۵].

### ۲-۱- شارژر

شارژر، مدلی مابین شبکه و باتری است که از ادوات الکترونیک قدرت در ساختار خود استفاده کرده است. وظیفه شارژر، تبدیل برق متناوب به برق مستقیم با سطح ولتاژ مورد نیاز باتری است. شارژر به صورت یک طرفه و دوطرفه است که نوع یک طرفه، تنها توان اکتیو را در جهت شبکه به باتری کنترل می‌کند؛ ولی نوع دوطرفه توان اکتیو و راکتیو را در دو جهت شبکه به شارژر و شارژر به شبکه کنترل می‌کند. نواحی کاری شارژر دوطرفه به صورت شکل (۱) است که در چهار ناحیه مختصات PQ عمل می‌کند. به این شارژر، شارژر چهار ربعی<sup>۶</sup> (FQ) نیز گفته می‌شود [۲۵].

انرژی از شبکه بالادست ناشی از خودروهای الکتریکی را موجب می‌شود. مراجع [۱۸-۲۰] از منابع تولید بادی استفاده کرده‌اند. در این مراجع تأثیرات استفاده هم‌زمان منابع بادی و خودروهای الکتریکی در شبکه ارزیابی شده است. براساس نتایج آنها، دریافت انرژی خودروهای الکتریکی از منابع بادی، تقاضای انرژی از شبکه را کاهش می‌دهد، تلفات کاهش می‌یابد و ولتاژ تنظیم می‌شود. همچنین قیمت انرژی در این موارد کاهش می‌یابد. علاوه بر موارد بالا، استفاده از منابع تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی، کاربرد خودروهای الکتریکی به عنوان رزرو را موجب می‌شود [۲۱]، [۲۲]. استفاده این ادوات در شبکه، افزایش قابلیت اطمینان شبکه را نیز موجب می‌شود [۲۳].

برخی از مقالات مانند [۲۴، ۲۵] استفاده از شارژر دوطرفه را برای خودروهای الکتریکی پیشنهاد کرده‌اند. براساس نتایج مراجع یادشده، شارژر دوطرفه، قابلیت کنترل هم‌زمان توان اکتیو باتری و توان راکتیو شارژر را دارد. بنابراین در این مقاله مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی انجام شده است. کمینه‌سازی خرید انرژی از شبکه بالادست و بیشینه‌سازی درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو به عنوان تابع هدف، مسئله مذکور فرض می‌شود. همچنین قیود مسئله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر خودروهای الکتریکی و محدودیت‌های شبکه مانند ولتاژ باس‌ها، ظرفیت شبکه بالادست و توان عبوری خطوط هستند. شایان ذکر است مسئله به دست آمده به صورت مسئله‌ای غیرخطی است. سپس با استفاده از روش‌های مخصوص خطی‌سازی، مسئله ذکر شده به مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح<sup>۷</sup> (MILP) تبدیل می‌شود. در نهایت مسئله نهایی بر روی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باسه، اعمال و توانمندی مسئله ارزیابی می‌شود.

در این مقاله، مدل‌سازی مسئله مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی به صورت مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح به عنوان نوآوری محسوب می‌شود.

مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی به صورت ...

الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو به عنوان تابع هدف استفاده شده است. قیود مسئله نیز شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر خودروهای الکتریکی قرار گرفته در پارکینگ و محدودیت شاخص های شبکه هستند؛ بنابراین مدل ریاضی مسئله مذکور به صورت زیر است:

$$\min \sum_{b \in \mathcal{Q}_b} \sum_{t \in \mathcal{Q}_t} \{ \lambda_t^p F_b P G_{b,t} - \lambda_t^q |Q E_{b,t}| \} \quad (2)$$

به شرطی که:

$$P G_{b,t} - P D_{b,t} - P E_{b,t} = \sum_{j \in \mathcal{Q}_b} A_{b,j} P L_{b,j,t} \quad \forall b,t \quad (3)$$

$$Q G_{b,t} - Q D_{b,t} - Q E_{b,t} = \sum_{j \in \mathcal{Q}_b} A_{b,j} Q L_{b,j,t} \quad \forall b,t \quad (4)$$

$$P L_{b,j,t} = g_{b,j} (V_{b,t})^2 - V_{b,t} V_{j,t} \{ g_{b,j} \cos(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) + b_{b,j} \sin(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) \} \quad \forall b,j,t \quad (5)$$

$$Q L_{b,j,t} = -b_{b,j} (V_{b,t})^2 - V_{b,t} V_{j,t} \{ g_{b,j} \sin(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) - b_{b,j} \cos(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) \} \quad \forall b,j,t \quad (6)$$

$$(P L_{b,j,t})^2 + (Q L_{b,j,t})^2 \leq (S L_{b,j}^{\max})^2 \quad \forall b,j,t \quad (7)$$

$$(P G_{b,t})^2 + (Q G_{b,t})^2 \leq (S G_b^{\max})^2 \quad \forall b,t \quad (8)$$

$$V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \quad \forall b,t \quad (9)$$

$$P E_{b,t} = P B_{b,t} + P L C_{b,t} \quad \forall b,t \quad (10)$$

$$Q E_{b,t} = Q C_{b,t} + Q L C_{b,t} \quad \forall b,t \quad (11)$$

$$P L C_{b,t} = a_p |P E_{b,t}| + a_q |Q E_{b,t}| \quad \forall b,t \quad (12)$$

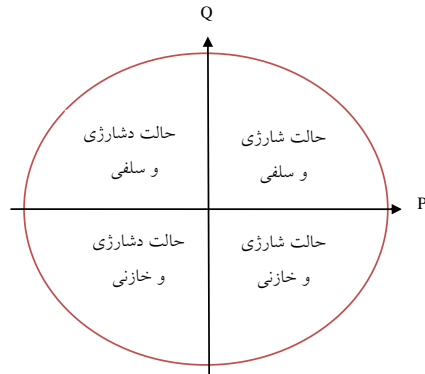
$$Q L C_{b,t} = b_p |P E_{b,t}| + b_q |Q E_{b,t}| \quad \forall b,t \quad (13)$$

$$(P E_{b,t})^2 + (Q E_{b,t})^2 \leq (S E_{b,t}^{\max})^2 \quad \forall b,t \quad (14)$$

$$0 \leq P B_{b,t} \leq P B_{b,t}^{\max} \quad \forall b,t \quad (15)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{Q}_t} T_{step} P B_{b,t} = R E_b \quad \forall b \quad (16)$$

رابطه (۲) تابع هدف مسئله را معرفی می کند که شامل دو بخش است: بخش اول به کمیته سازی خرید انرژی از شبکه بالادست اشاره می کند [۲۷] و بخش دوم بیشینه سازی درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو را معرفی می کند [۲۸]. روابط (۳) الی (۶) به معادلات پخش توان اشاره دارند؛ به طوری که تعادل توان اکتیو و راکتیو در



شکل (۱): نواحی کاری شارژر دوطرفه [۲۵]

### ۲-۲- باتری

به علت بازده بالا، وزن پایین و چگالی انرژی بالای باتری های نوع لیتیوم - یون (Li-ion)، عموماً خودروهای الکتریکی از این نوع باتری استفاده می کنند [۲۵]. باتری Li-ion و انواع دیگر باتری ها، پارامترهای مشخص کننده مهمی از قبیل ظرفیت باتری، میزان انرژی الکتریکی مصرف شده به ازای مسافت پیموده شده<sup>۷</sup> (ECPM)، حالت شارژ<sup>۸</sup> (SOC) و نرخ شارژ دارند. ظرفیت باتری نشان دهنده حداکثر انرژی ذخیره شده در باتری است. ECPM نشان دهنده میزان انرژی مصرفی باتری به ازای هر مایل است. حالت شارژ میزان انرژی باقی مانده در باتری را نشان می دهد و نرخ شارژ بیان کننده توان شارژ باتری در هر لحظه است؛ از این رو، انرژی مورد نیاز باتری خودروی الکتریکی برای مسافت (EC) به صورت رابطه زیر بیان می شود [۱۰]:

$$EC = ECPM \times L \quad (1)$$

در این رابطه L معرف مسافت طی شده خودروی الکتریکی در طول مسافت است.

### ۳- مدل مسئله

#### ۳-۱- مدل مسئله غیر خطی

در این بخش، مدل مسئله مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی ارائه می شود. در مسئله یاد شده از کمیته سازی خرید انرژی از شبکه بالادست و بیشینه سازی درآمد خودروهای

$t$  اشاره می‌کند.  $NE$  نیز برابر تعداد کل خودروهای الکتریکی قرار گرفته در پارکینگ است.

### ۳-۲- تقریب خطی معادلات پخش توان

در قیود پخش توان، روابط (۵) و (۶)، ساختار غیرخطی دارند. مسئله خطی در مقایسه با مسئله غیرخطی، سرعت اجرایی بالا و احتمال رسیدن به جواب بهینه سراسری در نرم‌افزار GAMS را دارد؛ از این رو، برای رسیدن به اهداف ذکر شده مسئله خطی، از تقریب خطی معادلات پخش توان برای جایگزینی در روابط (۵) و (۶) استفاده می‌شود. این روش بر مبنای سری تیلور است که فرضیه‌های زیر برای آن در نظر گرفته شده است [۲۹]:

- دامنه ولتاژ باس نزدیک به یک پریونیت است.

- اختلاف زاویه ولتاژ دو سر خط (مابین دو باس) کوچک است؛ یعنی زاویه مذکور کمتر از ۶ درجه (۰/۱۰۵ رادیان) است.

بر اساس فرضیه اول، ولتاژ باس به صورت  $I + \Delta V$  بیان

می‌شود. همچنین بر اساس فرضیه دوم، عبارت‌های  $\theta_{b,t} - \theta_{j,t}$  و  $\sin(\theta_{b,t} - \theta_{j,t})$  به ترتیب برابر ۱ و  $\theta_{b,t} - \theta_{j,t}$  هستند. در این روش از عبارت‌های  $(\theta_{b,t} - \theta_{j,t})^2$ ،  $\Delta V$  و  $(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) \Delta V$  به علت ناچیز بودن مقدار آنها، صرف نظر می‌شود؛ بنابراین روابط (۵) و (۶) برابرند با:

$$PL_{b,j,t} = g_{b,j}(\Delta V_{b,t} - \Delta V_{j,t}) - b_{b,j}(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) \quad (20)$$

$$\forall b,j,t$$

$$QL_{b,j,t} = -b_{b,j}(\Delta V_{b,t} - \Delta V_{j,t}) - g_{b,j}(\theta_{b,t} - \theta_{j,t}) \quad (21)$$

$$\forall b,j,t$$

### ۳-۳- مدل مسئله تقریب خطی

در مدل مسئله ارائه شده در بخش ۳-۱، روابط (۵) الی (۸) و (۱۲) الی (۱۴)، ساختار غیرخطی دارند. این امر، ایجاد مسئله غیرخطی را موجب می‌شود؛ بنابراین استفاده از موتورهای حل مرسوم برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۱۱</sup> (NLP) مانند CONOPT در نرم‌افزار GAMS، دو عیب عمده را موجب می‌شود که عبارت‌اند از [۳۰]:

هر لحظه و برای هر باس شبکه به ترتیب در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. با توجه به این روابط، خودروهای الکتریکی به صورت بار در مسئله مدنظر قرار گرفته است. روابط (۵) و (۶) توان اکتیو و راکتیو عبوری خطوط در لحظات مختلف را به ترتیب ارائه می‌دهند. محدودیت شاخص‌های شبکه، مانند توان عبوری خطوط، شبکه بالادست و دامنه ولتاژ باس‌ها در روابط (۷) الی (۹) بیان شده‌اند. روابط (۱۰) الی (۱۶) معادلات حاکم بر خودروهای الکتریکی قرار گرفته در پارکینگ را بیان می‌کنند. این روابط به ترتیب نشان‌دهنده تعادل توان اکتیو بین شبکه و باتری‌ها، تعادل توان راکتیو مابین شبکه و شارژرها، تلفات اکتیو و راکتیو شارژرها، محدودیت ظرفیت شارژرها، محدودیت نرخ شارژ باتری‌ها و انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی هستند. در این مقاله، تلفات اکتیو و راکتیو شارژرها بر اساس [۲۶] برحسب ضریبی از توان اکتیو و راکتیو خودروهای الکتریکی بیان شده است. علاوه بر موضوع یادشده، در این مقاله، تنها حالت شارژ خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است؛ زیرا با فرض حضور حالت دشارژ، عمر واقعی باتری نیز کاهش می‌یابد؛ در این صورت مالکان خودروهای الکتریکی تمایلی به دشارژر خودروهای الکتریکی به هدف تزریق توان اکتیو به شبکه ندارند [۲۴]. با توجه به روابط (۱۰) الی (۱۶)، توان و انرژی چندین خودروی الکتریکی به صورت مجتمع در این مقاله استفاده شده است؛ یعنی در این مقاله فرض شده است تعدادی خودروی الکتریکی در پارکینگ قرار دارند و توان و انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی قرار گرفته در پارکینگ در روابط محاسبه می‌شود. پس نرخ شارژ، ظرفیت شارژر و انرژی مورد نیاز در پارکینگ به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$PB_i^{\max} = \sum_{i=1}^{NE_i} CR_i \quad (17)$$

$$SE_i^{\max} = \sum_{i=1}^{NE_i} CC_i \quad (18)$$

$$RE = \sum_{i=1}^{NE} EC_i \quad (19)$$

در روابط بالا،  $CR_i$  به ترتیب معرف نرخ شارژ و ظرفیت شارژر خودروی الکتریکی  $i$  است.  $NE_i$  نیز به تعداد خودروهای الکتریکی قرار گرفته در پارکینگ در لحظه

رابطه (۲۲) نشان‌دهنده تابع هدف مسئله است که متناظر با تابع هدف مسئله غیرخطی است. (۲۳) شامل معادلات پخش توان با تقریب خطی است. رابطه (۷) و (۸) به صورت صفحه دایره‌ای در مختصات PQ هستند؛ بنابراین برای بیان رابطه تقریب خطی معادل صفحه دایره‌ای از اشتراک صفحات مربعی حاصل می‌شود که هرکدام اختلاف زاویه متفاوت با محور افقی دارند [۳۱، ۳۲]. بنابراین براساس [۳۲]، معادلات تقریب خطی متناظر با روابط (۷) و (۸) به ترتیب برابر (۲۴) و (۲۵) خواهند بود. رابطه (۲۶) معادل رابطه (۹) است که استخراج شده از فرضیه اول بخش ۳-۲ است. رابطه (۲۷) نیز متناظر با روابط (۱۰) و (۱۱) است.

بیان خطی روابط (۱۲) و (۱۳) به صورت روابط (۲۸) و (۲۹) است. در این روابط،  $PE_{b,t}$  به علت روابط (۱۰) و (۱۵) همواره مثبت است؛ بنابراین  $PE_{b,t}$  از قدر مطلق روابط (۱۲) و (۱۳) خارج می‌شود؛ اما شارژر می‌تواند در حالت‌های سلفی و یا خازنی عمل کند؛ در نتیجه،  $QE_{b,t}$  مقدار مثبت (سلفی) و منفی (خازنی) دارد. در این مقاله برای خارج شدن  $QE_{b,t}$  از قدر مطلق روابط (۱۲) و (۱۳)،  $QE_{b,t}$  به دو مؤلفه مثبت و منفی تقسیم می‌شود که در صورت فعال بودن یک مؤلفه (مانند مؤلفه مثبت)، مؤلفه دیگر (مؤلفه منفی) برابر صفر یا غیرفعال است. این امر با در نظر گرفتن متغیر باینری  $(x_{b,t})$  و روابط (۳۰) الی (۳۲) اجراء می‌شود؛ برای مثال، براساس روابط (۳۰) و (۳۱)، در صورتی که شارژر به صورت خازنی عمل کند، متغیر باینری برابر صفر است. پس براساس رابطه (۳۰)، مؤلفه مثبت  $QE_{b,t}$  برابر صفر است و براساس رابطه (۳۱)، مؤلفه منفی  $QE_{b,t}$  مخالف صفر است. شایان ذکر است قدر مطلق  $QE_{b,t}$  به صورت مابه‌التفاوت مؤلفه مثبت و منفی  $QE_{b,t}$  است. پس معادل روابط (۱۲) و (۱۳) به صورت روابط (۲۸) الی (۳۲) خواهد بود.

رابطه (۱۴) همانند رابطه (۷) بیان‌کننده صفحه دایره‌ای در مختصات PQ است. براساس [۳۲]، معادله تقریب خطی متناظر با رابطه (۱۴) به صورت ضابطه (۳۳) خواهد بود. رابطه (۳۴) نیز بیان‌کننده روابط محدودیت نرخ شارژ باتری‌ها و انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی است.

- به علت نبود غیرخطی (۵) الی (۸) و (۱۲) الی (۱۴)، ناحیه ممکن غیرمحدب است؛ بنابراین امکان متوقف شدن حل پس از یافتن بهینه محلی با موتور حل NLP وجود دارد.

- به علت روش‌های حل عددی مبنی بر تکرار برای مسائل غیرخطی، روند حل مسئله از نظر زمانی طولانی است؛ بنابراین سرعت اجرای مسئله پایین است.

برای داشتن جواب بهینه سراسری و سرعت اجرایی بالا، در این مقاله استفاده از معادلات خطی متناظر با معادلات غیرخطی به‌عنوان جایگزین معادلات غیرخطی پیشنهاد می‌شود؛ زیرا مسئله خطی، به داشتن جواب بهینه سراسری قادر است و سرعت اجرایی آن نسبت به مسئله غیرخطی بالاتر است؛ بنابراین مسئله ارائه شده در بخش ۳-۱ به صورت زیر به‌عنوان مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح بازنویسی می‌شود.

$$\min \sum_{b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T}} \{ \lambda_t^p F_b PG_{b,t} - \lambda_t^q (QE_{b,t}^+ - QE_{b,t}^-) \} \quad (22)$$

به شرطی که:

$$(23) \quad (3), (4), (20), (21)$$

$$PL_{b,j,t} \cos(k \Delta\alpha) + QL_{b,j,t} \sin(k \Delta\alpha) \leq SL_{b,j}^{\max} \quad \forall b, j, t, k \quad (24)$$

$$PG_{b,t} \cos(k \Delta\alpha) + QG_{b,t} \sin(k \Delta\alpha) \leq SG_b^{\max} \quad \forall b, t, k \quad (25)$$

$$V_b^{\min} - 1 \leq \Delta V_{b,t} \leq V_b^{\max} - 1 \quad \forall b, t \quad (26)$$

$$(27) \quad (10) \text{ و } (11)$$

$$PLC_{b,t} = a_p PE_{b,t} + a_q (QE_{b,t}^+ - QE_{b,t}^-) \quad \forall b, t \quad (28)$$

$$QLC_{b,t} = b_p PE_{b,t} + b_q (QE_{b,t}^+ - QE_{b,t}^-) \quad \forall b, t \quad (29)$$

$$0 \leq QE_{b,t}^+ \leq SE_{b,t}^{\max} x_{b,t} \quad \forall b, t \quad (30)$$

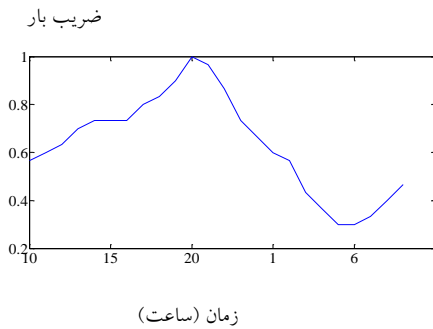
$$-SE_{b,t}^{\max} (1 - x_{b,t}) \leq QE_{b,t}^- \leq 0 \quad \forall b, t \quad (31)$$

$$QE_{b,t} = QE_{b,t}^+ + QE_{b,t}^- \quad \forall b, t \quad (32)$$

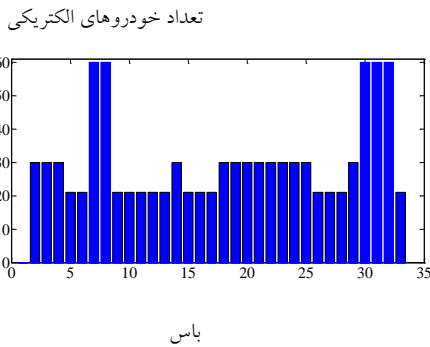
$$PE_{b,t} \cos(k \Delta\alpha) + QE_{b,t} \sin(k \Delta\alpha) \leq SE_{b,t}^{\max} \quad \forall b, t, k \quad (33)$$

$$(34) \quad (15) \text{ و } (16)$$

توان‌های اکتیو و راکتیو در حدود ۳٪ است. پس میزان اختلاف کمیت‌های شبکه بین هر دو مورد ناچیز است. علاوه بر موارد یادشده، سرعت اجرایی مدل مسئله MILP بسیار بالاتر از مدل مسئله NLP است؛ بنابراین در این صورت، مدل مسئله MILP جایگزین مناسبی برای مدل مسئله NLP است.



شکل (۲): منحنی روزانه ضریب بار



شکل (۳): تعداد خودروهای الکتریکی در هر باس

جدول (۱): مقایسه نتایج مدل مسائل NLP و MILP

تغییرات	MILP	NLP	مدل
مدت زمان اجرایی (ثانیه)	۵۷	۳۳۲	
هزینه انرژی (\$)	۱۵۹۰	۱۶۳۶	
درآمد خودروهای الکتریکی (\$)	۱۱۱/۳	۱۰۹/۶	
تلفات انرژی (مگاوات ساعت)	۲/۸۴	۲/۸۷	
مجموع تلفات راکتیو (مگاوار ساعت)	۱/۸۸	۱/۹۰	
میانگین ولتاژ (پرینیت)	۰,۹۶۲	۰,۹۵۶	
میانگین زاویه ولتاژ (رادیان)	-۰,۰۰۳۰۱	-۰,۰۰۳	

(۲) بررسی تأثیرات اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه در صورت نبود مدیریت توان آنها: شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب منحنی روزانه توان ظاهری<sup>۱۱</sup> شبکه و پروفیل ولتاژ لحظه پیک بار را برای مسئله نبود مدیریت توان خودروهای

## ۴- نتایج عددی

### ۴-۱- مورد مطالعاتی

در این مقاله، مسئله پیشنهادی بر روی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باسه اجرا می‌شود [۳۳]. بارهای اکتیو و راکتیو لحظه اوج بار در [۳۳] ارائه شده‌اند و بار اکتیو و راکتیو ساعات دیگر از ضرب منحنی ضریب بار همانند شکل (۲) در میزان بار اکتیو و راکتیو ساعت اوج بار به دست می‌آیند. قیمت انرژی در [۱۱] ارائه شده است. حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ باس‌ها به ترتیب برابر ۰/۹ و ۱/۰۵ پرینیت در نظر گرفته شده‌اند. قدرت و ولتاژ مبنا به ترتیب برابر ۱ مگاوات و ۱۲/۶۶ کیلوولت است [۳۳].

در این مقاله همانند [۱۰] فرض شده است خودروهای الکتریکی بعد از آخرین سفرشان در طول شبانه‌روز به پارکینگ برمی‌گردند و به شبکه وصل می‌شوند؛ بنابراین زمان اتصال (ورود) خودروهای الکتریکی به شبکه همانند منحنی ورود خودروهای الکتریکی در [۱۰] است. زمان خروج (قطع اتصال) خودروهای الکتریکی از شبکه بین ساعت‌های ۵:۰۰ الی ۱۰:۰۰ صبح روز بعد فرض شده است. بر این اساس، زمان شروع شبیه‌سازی به علت رابطه (۱۶) برابر ساعت ۱۰ صبح است. همچنین تعداد خودروهای الکتریکی قرارگرفته در هر باس به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شده‌اند. ظرفیت شارژر و ضرایب مربوط به تلفات اکتیو و راکتیو شارژرها از [۲۶] انتخاب شده‌اند. ظرفیت باتری، نرخ شارژ، حالت شارژ،  $EC$ ،  $L$  و دیگر پارامترهای مربوط به خودروهای الکتریکی براساس [۱۰] هستند. همچنین شبیه‌سازی برای یک روز عادی تابستان انجام شده است [۱۰].

### ۴-۲- نتایج

در این مقاله از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS.23.2 برای شبیه‌سازی موارد مختلف استفاده شده است [۳۴].

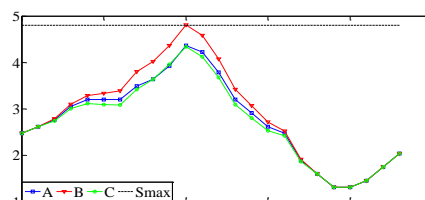
(۱) مقایسه نتایج مدل مسائل NLP و MILP: جدول (۱)، نتایج این بخش را نشان می‌دهد. براساس جدول مذکور، دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها در هر دو مدل، اختلاف کمی در حدود ۰/۵٪ دارند. همچنین میزان اختلاف برای



(۳) بررسی تأثیرات اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه در صورت مدیریت توان آنها: شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب منحنی روزانه توان ظاهری شبکه و منحنی روزانه ولتاژ باس ۱۸ را برای مسئله مدیریت توان خودروهای الکتریکی در شبکه نشان می‌دهند. براساس شکل (۵)، دامنه ولتاژ باس ۱۸ نسبت به بقیه باس‌ها، کمترین مقدار را دارد؛ از این رو در این بخش، ولتاژ باس ۱۸ برای بررسی تغییرات ولتاژ شبکه در نظر گرفته شد. در این بخش سه مورد مطالعاتی از قبیل حضورنداشتن خودروهای الکتریکی در شبکه (A)، حضور خودروهای الکتریکی در شبکه، بدون در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (B) و با در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (C) با ضریب نفوذ ۱۰۰ درصدی انجام شده‌اند. با توجه به شکل (۶)، مدیریت شارژ (توان اکتیو) موجب اتصال خودروهای الکتریکی در ساعات کم‌باری به شبکه می‌شود. در این بازه، توان ظاهری و ولتاژ از حدود مجاز خود، فاصله بیشتری نسبت به بقیه ساعات دارند. پس در این صورت ۱۰۰٪ خودروهای الکتریکی حضور یافته در شبکه قادرند از شبکه توان دریافت کنند. حال در صورت استفاده نکردن از توان راکتیو شارژرها، ولتاژ باس‌ها براساس شکل (۷) در ساعات کم‌باری نسبت به مورد A کاهش می‌یابد؛ ولی در صورت استفاده از توان راکتیو شارژرها و تزریق آن به شبکه، ولتاژ باس‌ها نسبت به مورد A افزایش می‌یابد. همچنین به علت بخش دوم تابع هدف (۲۲)، خودروهای الکتریکی توان راکتیو را در کلیه ساعات شبیه‌سازی به شبکه تزریق می‌کنند؛ بنابراین ولتاژ باس‌ها در کلیه ساعات شبیه‌سازی برای مورد C نسبت به موارد A و B میزان بالاتری دارد. براساس شکل (۶)، تزریق توان راکتیو شارژرها کمتر از توان راکتیو مصرفی بارها در ساعات بین ۱۲:۰۰ الی ۲۱:۰۰ است. پس توان ظاهری در این ساعات برای مورد C کمتر از مورد A است. در ساعات ۲۲:۰۰ الی ۸:۰۰ به علت بخش دوم تابع هدف (۲۲)، توان راکتیو تزریقی شارژرها بسیار بالاتر از توان راکتیو مصرفی بارها است. پس به علت مورد ذکر شده و دریافت انرژی خودروهای الکتریکی از شبکه در ساعات کم‌باری، میزان توان ظاهری در ساعات ۲۲:۰۰ الی ۸:۰۰ نزدیک حد مجاز خود است.

الکتریکی در شبکه نشان می‌دهند؛ بنابراین در این بخش سه مورد مطالعاتی از قبیل حضورنداشتن خودروهای الکتریکی در شبکه (A)، حضور خودروهای الکتریکی در شبکه بدون در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (B) و با در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (C) با ضریب نفوذ ۲۳٪ انجام شده‌اند. براساس شکل (۴)، در صورت نبود مدیریت شارژ (توان اکتیو) خودروهای الکتریکی، بیشتر آنها در ساعات اوج بار به شبکه متصل می‌شوند؛ بنابراین در صورت استفاده نکردن از توان راکتیو شارژرها، حدود ۲۳٪ از خودروهای الکتریکی حضور یافته در شبکه به دریافت انرژی از شبکه قادر خواهند بود؛ زیرا با توجه به شکل (۴)، توان ظاهری شبکه در ضریب نفوذ ۲۳٪ به حد مجاز خود رسیده است. همچنین براساس شکل (۵)، ولتاژ باس‌ها در ضریب نفوذ ۲۳٪، میزان کمتری نسبت به مورد A دارد. این کاهش به علت دریافت توان اکتیو بیشتر از شبکه بالادست ناشی از خودروهای الکتریکی نسبت به مورد A است؛ ولی با استفاده از توان راکتیو شارژرها، ولتاژ و توان ظاهری شبکه نسبت به مورد A به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. بنابراین به علت کاهش توان ظاهری شبکه و فاصله گرفتن از حد مجاز، خودروهای الکتریکی بیشتری از شبکه توان دریافت می‌کنند.

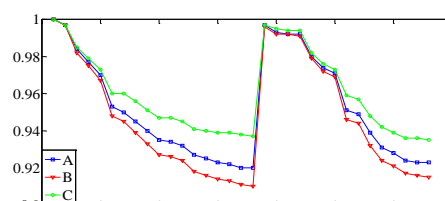
توان ظاهری (پرینیت)



زمان (ساعت)

شکل (۴): منحنی روزانه توان ظاهری شبکه

ولتاژ (پرینیت)



باس

شکل (۵): پروفیل ولتاژ شبکه در لحظه پیک بار

جدول (۲): حداکثر ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی

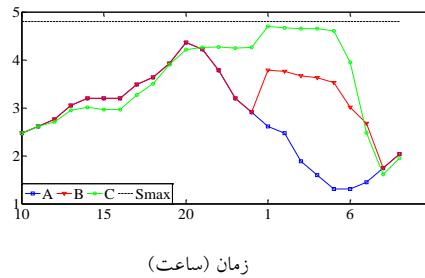
مورد مطالعاتی	A	B	C	D
حداکثر درصد نفوذ	۲۳	۴۶	۱۴۳	۲۱۲

(۵) ارزیابی هزینه انرژی و درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو: جدول (۳) نتایج این بخش را نشان می‌دهد. در این بخش پنج مورد مطالعاتی متفاوت صورت گرفته است که مورد مطالعاتی اول (A0) برای مسئله بدون حضور خودروهای الکتریکی در شبکه است و موارد دیگر، همانند موارد انجام شده در زیر بخش قبل است (یعنی A الی D). با توجه به جدول مذکور، افزایش ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی موجب افزایش هزینه‌ها و درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو می‌شود. همچنین استفاده از توان راکتیو شارژرها نیز افزایش هزینه‌ها را موجب می‌شود؛ زیرا توان راکتیو شارژرها موجب افزایش تلفات اکتیو شارژر (۲۸) و در نهایت موجب افزایش تلفات اکتیو شبکه می‌شود. شایان ذکر است استفاده از توان راکتیو شارژرها، کاهش پرداختی خودروهای الکتریکی به شبکه را موجب می‌شود. به عبارت دیگر، استفاده از توان راکتیو شارژرها، کاهش هزینه شارژر خودروهای الکتریکی را موجب می‌شود. برای مثال، هزینه شارژر کلیه خودروهای الکتریکی در مورد D برابر ۲۳۱ دلار است و درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو نیز برابر ۱۱۱/۳ دلار است. پس پرداختی خالص کلیه خودروهای الکتریکی به شبکه (هزینه شارژر خالص) برابر ۱۱۹/۷ دلار است؛ بنابراین در صورت استفاده از توان راکتیو شارژرها، پرداختی خالص خودروهای الکتریکی به شبکه در حدود ۵۰٪ نسبت به مورد C کاهش می‌یابد.

جدول (۳): برآورد هزینه‌ها و درآمدها

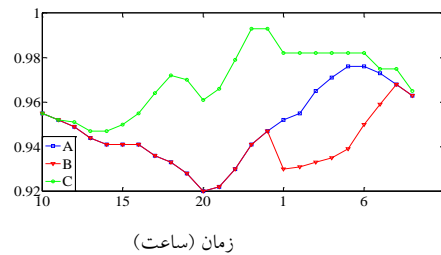
مورد مطالعاتی	A0	A	B	C	D
درصد نفوذ خودروهای الکتریکی	۰	۲۳	۲۳	۱۰۰	۱۰۰
هزینه انرژی (\$)	۱۳۷۲	۱۴۷۵	۱۴۸۲	۱۵۷۸	۱۵۹۰
هزینه شارژر (\$)	۰	۱۰۳	۱۰۵	۲۲۶	۲۳۱
درآمد خودروهای الکتریکی (\$)	۰	۰	۳۵	۰	۱۱۱/۳

توان ظاهری (پرونیوت)



شکل (۶): منحنی روزانه توان ظاهری شبکه

ولتاژ (پرونیوت)



شکل (۷): منحنی روزانه ولتاژ باس ۱۸

(۴) ارزیابی حداکثر ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی: جدول (۲) حداکثر درصد نفوذ خودروهای الکتریکی را برای موارد مختلف از قبیل نبود مدیریت توان شبکه در حضور خودروهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (A)، با در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (B)، مدیریت توان شبکه در حضور خودروهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (C) و با در نظر گرفتن توان راکتیو آنها (D) نشان می‌دهد. طبق این جدول، کمترین حداکثر درصد نفوذ خودروهای الکتریکی در مورد A اتفاق می‌افتد؛ زیرا در این مورد، خودروهای الکتریکی در ساعات پرباری به شبکه وصل می‌شوند که در این صورت فاصله توان ظاهری با حد مجاز خود کمترین مقدار را دارد. در صورتی که مدیریت توان اکتیو و راکتیو خودروهای الکتریکی (D)، میزان حداکثر درصد نفوذ خودروهای الکتریکی بیشترین مقدار ممکن را نسبت به موارد مطالعاتی دیگر دارد. در این مقاله، حداکثر درصد نفوذ خودروهای الکتریکی به گونه‌ای به دست آمدند که قیود (۲۴) الی (۲۶) در مرز خود قرار گرفته‌اند. به عبارتی دیگر، در صورتی که درصد نفوذ بیش از حداکثر درصد نفوذ خودروهای الکتریکی شود، نرم‌افزار GAMS جواب غیرشدنی<sup>۱۲</sup> دارد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مسئله مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند با استفاده از خودروهای الکتریکی ارائه شد. در مسئله مذکور، کمینه‌سازی هزینه انرژی و بیشینه‌سازی درآمد خودروهای الکتریکی حاصل از فروش توان راکتیو به‌عنوان تابع هدف و معادلات پخش توان، خودروهای الکتریکی و محدودیت شاخص‌های شبکه به‌عنوان قیود مدنظر واقع شده است. مسئله مدنظر ساختار غیرخطی دارد که برای دستیابی به عملکرد مناسب‌تر اجرای مسئله، مسئله غیرخطی به مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح تبدیل شد. سپس با اعمال مسئله مذکور به شبکه تست‌شده، توانمندی خودروهای الکتریکی در مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند ارزیابی شد. براساس نتایج به‌دست آمده، نبود مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی، افزایش تقاضای توان از شبکه بالادست در ساعات پیک بار را موجب می‌شود که به دنبال آن تلفات شبکه، افت ولتاژ باس‌ها افزایش می‌یابد. درنهایت حدود مجاز شاخص‌های شبکه از اتصال بیشتر خودروهای الکتریکی به شبکه جلوگیری می‌کنند. استفاده از توان راکتیو شارژرها در مورد ذکرشده، بهبود شاخص‌های شبکه و افزایش چند درصدی حداکثر ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی را موجب می‌شود؛ ولی مدیریت توان اکتیو و راکتیو خودروهای الکتریکی، افزایش بالای حداکثر ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی و بهبود شاخص‌های شبکه را موجب می‌شود. همچنین استفاده از توان راکتیو شارژرها، کاهش پرداختی خودروهای الکتریکی به شبکه را موجب می‌شود.

## علائم

متغیرها: متغیرها بر حسب پریونیت (p.u) هستند.

الکتریکی در پارکینگ	
توان راکتیو شارژر خودروهای الکتریکی در پارکینگ	$QC$
مؤلفه مثبت و منفی $QE$	$QE^+, QE^-$
دامنه، زاویه و انحراف ولتاژ	$V, \theta$
متغیر باینری بدون واحد	$\Delta V$ $x$
پارامترها: پارامترها بر حسب پریونیت هستند.	
ماتریس اتصال باس (خطی مابین باس $b, j$ وجود دارد، $A_{b,j}$ برابر ۱ است، در غیر این صورت صفر است) بدون واحد	$A$
ضرایب توان اکتیو و راکتیو در رابطه $PLC$ بدون واحد	$a_p, a_q$
ضرایب توان اکتیو و راکتیو در رابطه $QLC$ بدون واحد	$b_p, b_q$
ماتریس تلاقی شبکه بالادست و باس بدون واحد	$F$
ماتریس رسانایی و سوسپتانس خطوط	$g, b$
نرخ شارژ باتری و ظرفیت شارژر خودروهای الکتریکی در پارکینگ	$PB^{max}, SE^{max}$
توان اکتیو و راکتیو مصرفی	$PD, QD$
انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی در پارکینگ	$RE$
حداکثر مقدار تولید و خط گام زمانی بدون واحد	$SL^{max}, SG^{max}$ $T_{step}$
حداقل و حداکثر مقدار دامنه ولتاژ	$V^{max}, V^{min}$
قیمت انرژی و قیمت توان راکتیو بر حسب $\$/MVARh$ و $\$/MWh$	$\lambda^q, \lambda^p$
انحراف زاویه بر حسب رادیان	$\Delta\alpha$

## مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه باس، زمان، خط و قسمت‌های خطی‌سازی	$\varphi_b, \varphi_t, \varphi_k$
شمارنده باس، زمان، خط و قسمت خطی‌سازی	$b, t, l, k$

توان اکتیو باتری، توان اکتیو و راکتیو	$PB$
خودروهای الکتریکی در پارکینگ	$PE, QE$
توان اکتیو و راکتیو تولیدی	$PG, QG$
توان اکتیو و راکتیو عبوری خط	$PL, QL$
تلفات اکتیو و راکتیو شارژر خودروهای	$PLC, QLC$

10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000382, F4016008, 2016.

- [15] Shuang Gao, K.T., Chau, C.C., Chan, L.C., Wu, D., "Optimal control framework and scheme for integrating plug-in hybrid electric vehicles into grid", *Journal of Asian electric vehicles*, Vol. 9, No. 3, pp. 1473-1481, June 2011.
- [16] Luo, X., Chan, K.W., "Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution system to minimize power losses and improve voltage profile", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 8, No. 3, pp. 516-529, Feb. 2014.
- [17] Cheng, L., Chang, Y., Huang, R., "Mitigating voltage problem in distribution system with distributed solar generation using electric vehicles", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.6, No.4, pp.1475-1484, 2015.
- [18] Kavousi-Fard, A., Niknam, T., Fotuhi-Firuzabad, M., "Stochastic reconfiguration and optimal coordination of V2G plug-in electric vehicles considering correlated wind power generation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.6, No.3, pp.822-830, 2015.
- [19] Abdelsamad, S.F., Morsi, W.G., Sidhu, T.S., "Impact of wind-based distributed generation on electric energy in distribution systems embedded with electric vehicles", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.6, No.1, pp.79-87, 2015.
- [20] Wu, C.X., Chung, C.Y., Du, D.Y., "Reliability/cost evaluation with PEV and wind generation system", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.5, No.1, pp.273-281, 2014.
- [21] Momber, I., Morales-Espana, G., Ramos, A., Gomez, T., "PEV storage in multi-bus scheduling problems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.5, No.2, pp. 1079-1087, March 2014.
- [22] Hernandez, J.C., Sutil, F.S., "Electric vehicle charging stations feeded by renewable: PV and train regenerative braking," *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 14, No. 7, pp. 3262-3269, 2016.
- [23] Kavousi-Fard, A., Rostami, M., Niknam, T., "Reliability-oriented reconfiguration of vehicle-to-grid networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 11, No. 3, pp. 682-691, 2015.
- [24] Kisacikoglu, M.C., Kesler, M., Tolbert, L.M., "Single-phase on-board bidirectional PEV charger for V2G reactive power operation", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 3, pp. 767 - 775, Feb. 2015.
- [25] Kisacikoglu, M.C., Ozpineci, B., Tolbert, L.M., "EV/PHEV bidirectional charger assessment for V2G reactive power operation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No.12, pp.5717-5727, 2013.
- [26] Pirouzi, S., Latify, M.A., Yousefi, G.R., "Investigation on Reactive Power Support Capability of PEVs in Distribution Network Operation", 23<sup>rd</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2015.
- [27] Leou, R.C., "Optimal charging/discharging control for electric vehicles considering power system constraints and operation costs", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-7, 2015.
- [28] Farahani, H.F., Shayanfar, H.A., Ghazizadeh, M.S., "Incorporation of plug-in hybrid electric vehicle in
- [1] Ghasemipour, M.M., Tourani, M., Aghaebrahimi, M.R., "Electric Vehicles Parking (EVP) Sitting Considering GIS Information and the Extent of Urban Areas", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 71-84, 2014.
- [2] International energy outlook 2013, Energy Information Administration, U.S, July 2013, [www.eia.gov/ieo/](http://www.eia.gov/ieo/).
- [3] Kisacikoglu, M.C., Vehicle-to-Grid reactive power operation analysis of the EV/PHEV bidirectional battery charger, Ph.D. Thesis, University of Tennessee, May 2013.
- [4] Leou, R.C., Su, C.L., Lu, C.N., "Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 29, No. 3, pp. 1055-1063, May 2014.
- [5] Habib, S., Kamran, M., Rashid, U., "Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks –A review", *J. Power Sources*, Vol. 277, No. 4, pp. 205-214, 2015.
- [6] Veldman, E., Verzijlbergh, R.A., "Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 1, pp. 333-342, 2015.
- [7] El-Nozahy, M.S., Salama, M.M.A., "A comprehensive study of the impacts of PHEVs on residential distribution networks", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.5, No.1, pp. 332-342, 2014.
- [8] Shaaban, M.F., Atwa, Y.M., El-Saadany, E.F., "PEVs modeling and impacts mitigation in distribution networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.28, No.2, pp.1122-1131, 2013.
- [9] Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J., "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid", *Electr. Pow. Syst. Res.*, Vol. 81, No. 1, pp. 185-192, 2011.
- [10] Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems", *IEEE Trans on Smart Grid.*, Vol. 4, No. 3, pp. 1351-1360, 2013.
- [11] Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., "Impacts of controlled and uncontrolled PHEV charging on distribution systems", 9th IET International Conference on APSCOM, pp. 1-6, 2013.
- [12] Yu, R., Zhong W., Xie, S., Yuen, C., Gjessing, S., Zhang, Y., "Balancing power demand through EV mobility in vehicle-to-grid mobile energy networks," *IEEE Trans. Industrial Inf.*, Vol. 12, No. 1, pp. 79-90, 2016.
- [13] Xiang, Y., Liu, J., Liu, Y., "Optimal active distribution system management considering aggregated plug-in electric vehicles," *Electr. Pow. Syst. Res.*, Vol. 131, No. 2, pp. 105-115, 2016.
- [14] Yokoyama, R., Akiba, N., "Optimization-based simulation for evaluating electric vehicles with use of fast battery chargers," *J. Energy Eng.*

## مراجع

- optimal power flow problem, FERC Staff Technical Paper, 2012.
- [32] Pirouzi, S., Using electric vehicles in the active and reactive power management of smart distribution network, M.Sc Thesis, Isfahan University of Technology, September 2014.
- [33] Babu, P.R., Rakesh, C.P., Srikanth, G., Kumar, M.N., Reddy, D.P., "A novel approach for solving distribution networks", India Conference (INDICON), 2009 Annual IEEE, pp. 1-5, Dec. 2009.
- [34] Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). [Online]. Available: <http://www.gams.com>.
- the reactive power market", Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 1-24, 2012.
- [29] Zhang, H., Heydt, G.T., Vittal, V., Quintero, J., "An improved network model for transmission expansion planning considering reactive power and network losses", IEEE Trans on Power System, Vol. 28, No. 3, pp. 3471-3479, 2013.
- [30] The GAMS Users Guide. GAMS, 2011. [Online] Available: <http://www.gams.com>.
- [31] O'Neill, R.P., Castillo, A., Cain, M.B., The IV formulation and linear approximations of the AC

---

<sup>1</sup> Department of Energy (DOE)

<sup>2</sup> Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

<sup>3</sup> Hybrid Electric Vehicle (HEV)

<sup>4</sup> Battery Electric Vehicle (BEV)

<sup>5</sup> Mixed Integer Linear Programming (MILP)

<sup>6</sup> Four Quadrant (FQ) Charger

<sup>7</sup> Electrical energy consumption per mile (ECPM)

<sup>8</sup> State of charge (SOC)

<sup>9</sup> The Linearization of AC Power Flow Equations

<sup>10</sup> Non-Linear Programming (NLP)

<sup>11</sup> Apparent power

<sup>12</sup> Infeasible solution