


Optimal planning of a virtual power plant considering uncertainties in electric vehicles, renewable energy resources, and participating demand response

 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.10.9>

Rana Heydari, Javad Nikoukar, Majid Gandomkar
Department of Electrical Engineering,
Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran

Abstract

Due to the progress of renewable energy technologies and the intention of energy policymakers to use these clean and cheap resources, many studies have focused on ways to take advantage of these energies. Limitations, such as low capacity, output power uncertainty, and sustainability problems, make the use of distributed energy resources costly and difficult. Among distributed generation resources, renewable energy resources such as wind energy and solar energy are more environmentally friendly and are used more than other technologies. Despite the many advantages of these resources, their output power depends on such factors as wind speed and solar intensity, which cannot be accurately predicted. For this reason, the infiltration of high levels of these resources into power systems increases system uncertainty and can reduce reliability while system reliability is very important for power system designers and operators, as well as energy consumers. To solve these problems, a new concept, named virtual power plant, is proposed. A virtual power plant is a collection of distributed energy resources that come together to participate in the market. Virtual power plants can efficiently coordinate, aggregate, and manage different distributed energy resources such as distributed generation, energy storage systems, and controllable loads. These plants are flexible agents for a range of distributed energy sources that can be used in wholesale markets to provide services to system operators. The energy management system is the heart of a virtual power plant that coordinates the flow of power from generators, controllable loads, and energy storage devices. This paper proposes a full model for optimal planning of a virtual power plant if uncertainties of distributed generation sources such as wind and solar energy, as well as electrical vehicles, are considered. To prevent the negative effects of the presence of electric vehicles on electricity networks, especially in virtual power plants, it is necessary to charge these vehicles in a controlled manner and with careful planning. In addition, the demand response whose modeling is based on price-based demand response for non-users and encouragement-based for electric vehicles is optimized on two scenarios, and a 32-bus network is studied. The main goal of the research is to maximize the profit of the virtual power plant for the simultaneous use of load response and electric vehicles with the capability of connecting to the grid.

Keywords: Virtual power plant, Demand response, Electric vehicles, Mixed-integer linear programming

Received: 2020 Desember 3

Accepted: 2021 June 21

برنامه ریزی بهینه نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پاسخگویی بار و خودروهای الکتریکی

نوع مطالعه: پژوهشی

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.10.9>

رعنا Heydari^۱، دانشجوی دکترا، جواد نیکوکار^۲، استادیار، مجید گندمکار^۳، دانشیار

۱ و ۲- گروه برق، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

Rana.heydari70@yahoo.com

Javad.nikoukar@yahoo.com

Gandomkar.majid@yahoo.com

چکیده:

با توجه به روند پیشرفت تکنولوژی‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و حمایت سیاست‌گذاران حوزه انرژی جهت استفاده بیشتر از این منابع پاک و ارزان، تحقیقات بسیاری در جهت بهره‌گیری هرچه بیشتر از این گونه انرژی‌ها در حال انجام است. محدودیت‌هایی از قبیل ظرفیت پایین، عدم قطعیت توان خروجی و مشکلات پایداری، استفاده از منابع انرژی پراکنده را پرهزینه و دشوار ساخته است. برای رفع این مشکلات، مفهومی جدید با عنوان نیروگاه مجازی پیشنهاد شده است. در این مقاله یک مدل کامل برای برنامه‌ریزی بهینه یک نیروگاه مجازی ارائه شده به صورتی که عدم قطعیت‌های منابع تولید پراکنده نظیر انرژی باد و خورشید و همچنین خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، از پاسخگویی بار که مدلسازی آن بر مبنای پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی و مبتنی بر تشویق برای خودروهای الکتریکی می‌باشد استفاده شده و در نهایت تابع هدف ارائه شده با روش برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط بهینه گردیده و یک شبکه ۳۲ شینه مورد مطالعه قرار گرفته که هدف پیشینه‌سازی سود نیروگاه مجازی بوده که برای این کار از استفاده همزمان از پاسخگویی بار و خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه مجازی، پاسخگویی بار، خودروی الکتریکی، برنامه ریزی خطی صحیح مختلط

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۳/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول : جواد نیکوکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۱- مقدمه

امروزه روش‌های مختلفی برای تولید و تامین انرژی الکتریکی وجود دارد. با این وجود، مصرف‌کنندگان همواره به دنبال روشی هستند که دارای بالاترین کیفیت، کم‌ترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان باشد. ریزشکبه‌ها و نیروگاه‌های مجازی دو راه‌حل قابل توجه برای تغذیه‌ی قابل اطمینان انرژی الکتریکی در سیستم قدرت هستند که در سال‌های اخیر ارائه و توسعه یافته‌اند. با توجه به اینکه این ساختارها شامل منابع انرژی پراکنده می‌باشند، برنامه‌ریزی مناسب آنها بسیار حائز اهمیت است.

یک نیروگاه مجازی می‌تواند به صورت کارا منابع انرژی پراکنده مختلف از قبیل تولیدات پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و بارهای قابل کنترل را هماهنگ، تجمیع و مدیریت کند. در سال‌های اخیر با پیاده‌سازی و پیشرفت تکنولوژی شبکه هوشمند، امکان بهره‌برداری از نیروگاه‌های مجازی بیش از پیش همواره‌تر شده است. به صورتی که بسیاری از کشورهای توسعه یافته، پروژه نیروگاه مجازی را پیاده‌سازی و اجرا کرده‌اند.

نیروگاه بادی و خورشیدی از مهم‌ترین اجزای نیروگاه مجازی هستند. برای کاهش نوسانات توان در نیروگاه مجازی که ناشی از تغییرات توان بادی و خورشیدی است از منابع انرژی کمکی نظیر توربین‌های گازی، ذخیره‌سازهای انرژی، خودروهای الکتریکی و دیگر منابع تولید پراکنده قابل کنترل استفاده می‌شود. به توجه به اهمیت بالای مفهوم نیروگاه مجازی، در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی بر روی آن انجام شده است که این تحقیقات اهداف مختلفی از قبیل پیکربندی ظرفیت، هماهنگ‌سازی عملکرد و افزایش سود را دنبال کرده‌اند. هدف بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه، بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه مجازی بوده است. (2010 Asmus, 2011 Pedrasaa, and et al) ایجاد بازارهای برق و در نظر گرفتن تشویق‌های مناسب سبب ایجاد انگیزه برای مصرف‌کنندگان برای شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار شده است. استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار هم برای مصرف‌کننده و هم برای شبکه مزایایی دارد؛ از این جهت که در صورت وجود تشویق‌های مناسب، برای مصرف‌کننده سودآوری مالی خواهد داشت و برای شبکه نیز به دلیل افزایش پایداری مورد توجه می‌باشد.

علاوه بر مطالب بیان شده، در سال‌های اخیر خودروهای الکتریکی پلاگاین که خودروهای الکتریکی هیبرید پلاگاین و خودروهای الکتریکی را شامل می‌شود، به دلیل مزایایی که نسبت به دیگر انواع تکنولوژی‌های حمل و نقل دارند، توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند. این مزایا شامل سازگاری با محیط‌زیست، سروصدای کم، بازده انرژی بالا، کاهش هزینه‌های عملیاتی، پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت محلی و فراهم کردن خدمات جانبی از طریق حالت تبادل انرژی خودرو به شبکه می‌باشد (2012 Wencong).

بر اساس مطالب بیان شده مشخص است که مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر انجام شود تا نتایج بدست آمده مطابق واقعیت بوده و قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند. علاوه بر این، خودروهای الکتریکی و بارهای پاسخگو نیز عضو جدانشدنی نیروگاه مجازی خواهند بود که در نظر گرفتن آنها در برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی، منجر به افزایش سود صاحبان خودروهای الکتریکی و بارهای پاسخگو و همچنین افزایش سود نیروگاه مجازی خواهد شد. از این رو، در این مقاله برنامه‌ریزی بهینه نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و همچنین خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار مطالعه شده است.

پاسخگویی بار می‌تواند به طور موثر هزینه‌های برق را برای مصرف‌کنندگان کاهش دهد. علاوه بر این، تحقیقات نشان داده است که نبود پاسخگویی بار در یک بازار برق تجدید ساختار یافته ممکن است منجر به فروپاشی آن شود (2010 Rahimi and et al) کنترل مستقیم بار، قبلاً توسط تعدادی از تغذیه‌کنندگان برق برای اجرای پاسخگویی بار اعمال شده است. کنترل مستقیم بار، خاموش و روشن کردن وسایل مصرف‌کنندگان را شامل می‌شود (2005 Chu and et al).

از سوی دیگر، کنترل قیمت، تشویقی بر اساس روش هدف‌گذاری (al) از سوی دیگر، کنترل قیمت، تشویقی بر اساس روش هدف‌گذاری شده در دل‌سرد کردن مصرف برق در طول دوره‌های پیک است (2009 Triki and et al). (2007 Herter) در (2011 Xiong and et al) روش برنامه‌ریزی لوازم برقی برای مدیریت مصرف توان در یک خانه استفاده شده است. نویسندگان، یک شبکه خانگی بر اساس طرح برنامه‌ریزی زمان واقعی برای مدیریت بار مصرف‌کنندگان در افق ۲۴ ساعته ارائه کرده‌اند.

در مرجع (2010 Samadi and et al)، پاسخگویی بار به عنوان ابزاری برای حفاظت شبکه از فروپاشی ولتاژ بررسی شده است. این مقاله روشی طراحی کرده است که قادر به کنترل مقدار کاهش بار در محل‌های مختلف است. روش پاسخگویی بار مبتنی بر مدل شیفت بار در (2010 Mohsenian-Rad and et al) ارائه شده است. در مقاله فوق از تئوری بازی برای فرمول‌بندی برنامه مصرف برق استفاده شده است. در مرجع (2014 Adika and et al) رویکرد پیشنهاد سمت تقاضای روز-پیش برای مدیریت انرژی خانه ارائه شده است. پیشنهاد سمت تقاضا یک روش مدیریت انرژی در حال ظهور است که مصرف‌کنندگان را برای تغییر منحنی مصرف خود در تبادل برای پاداش‌های مالی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

محققان در مرجع (Wu and et al. 2011) استراتژی‌های شارژ و دشارژ کنترل شده و کنترل نشده را از نقطه نظرهای متفاوت بررسی کرده‌اند. در مرجع (Saber and et al. 2012) در مدار قرارگیری واحدهای تولید توان شامل منابع بادی و خورشیدی در حضور خودروهای الکتریکی پلاگاین مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از سناریوهای تعریف شده برای در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع متناوب مورد نظر، آلودگی‌ها و هزینه مورد انتظار برنامه در مدار قرارگیری برای مجموعه‌ای از سناریوها حداقل شده است.

مراجع (Pipattanasomporn and et al, 2012 Nunna) ادغام کاربرد خودروهای الکتریکی و اجرای پاسخگویی بار را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌های پاسخگویی بار خانگی که لوازم خانگی هوشمند و خودروهای الکتریکی را شامل می‌شود، هزینه عملیاتی سیستم را کاهش می‌دهد؛ در حالی که آسایش مشتریان را حفظ می‌کند. مطالعه انجام شده در (Kempton and 2005) بیان می‌کند که خودروی الکتریکی تنها به معنی بار الکتریکی نیست بلکه منبع توانی برای تحمل پیک انرژی و ظرفیت ذخیره برای شبکه‌های برق است. در مرجع (Sousa and et al. 2012) برنامه‌ریزی منابع در شبکه توزیع هوشمند با توجه به حالت خودرو به شبکه مطالعه شده است. روشی عملی برای ادغام خودرو به شبکه و انرژی‌های تجدیدپذیر در یک شبکه توزیع کوچک و بحث روی مدل ادغام مورد نیاز، در مرجع (Battistelli and et al. 2012) ارائه شده است. حالت خودرو به ساختمان یکی از حالات ممکن است که برای نمایش ظرفیت خودروهای الکتریکی برای پشتیبانی شبکه در ساعات پیک در مدت زمان قطع برق در مرجع (Pang and et al. 2012) بررسی شده است. در مرجع (and et al 2012) حالت تبادل انرژی برای خودروهای الکتریکی پلاگاین تحت عنوان خودرو به خودرو معرفی شده و سپس مدل برنامه‌ریزی بهینه برای یک پارکینگ هوشمند پنجاه خودرویی با استفاده از حالات خودرو به شبکه، شبکه به خودرو و خودرو به خودرو ارائه شده است.

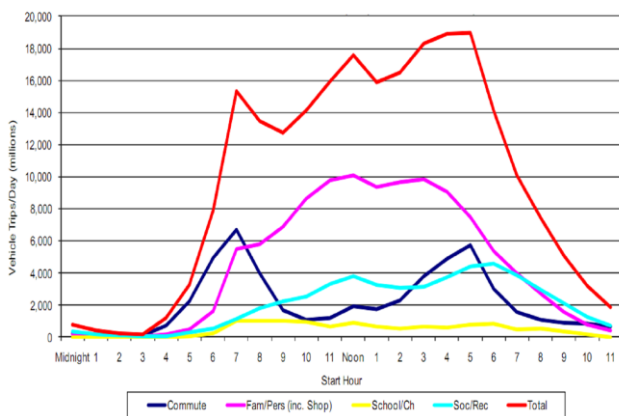
برخی از کارها به یکپارچه‌سازی خودروهای الکتریکی به منظور نمایش نقش آنها به صورت کامل برای کسب مزایای حالت خودرو به شبکه (Guille, 2010 Han and et al. 2009) و یا به معرفی مدل‌های جدید برای مشارکت یکپارچه‌سازها اختصاص یافته است. این یکپارچه‌سازی برای خودروهای الکتریکی برای یکپارچه‌سازی داخل شبکه همانند منابع انرژی پراکنده و همچنین تسهیل مشارکت آن‌ها در بازار و مدیریت شارژ و دشارژ لازم است. در (Guill 2009) بر ساختار فناوری اطلاعات برای مدیریت سیگنال‌های کنترل و زیرساخت‌های ارتباطی تمرکز شده است. در مرجع (Han 2010) نقش یکپارچه‌ساز در حداکثرسازی درآمد کلی یکپارچه‌ساز با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی بررسی شده است. به طور خلاصه نوآوری این مقاله عبارتند از:

تعدادی از محققان مدل‌های پیشنهاد سمت تقاضای مختلفی ارائه کرده‌اند. استراتژی پیشنهاد برای تغذیه‌کنندگان توان و مصرف‌کنندگان بزرگ برق در (Wen and et al. 2001) ارائه شده است. هدف تغذیه‌کنندگان و مصرف‌کنندگان برق، حداکثر کردن رفاه اجتماعی توسط قرار دادن پیشنهادهای خود بر اساس انتخاب ضرایب تابع عرضه-تقاضا است. استراتژی پیشنهاد بهینه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای خرده‌فروشان برق که توان را در بازار عمده‌فروشی می‌خرند و آن را به مصرف‌کنندگان نهایی ارائه می‌دهند، در (Herranz 2012) ارائه شده است. نویسندگان، طرح خود را به دو سال از داده‌های واقعی بازار اسپانیا برای نشان دادن کاهش عمده هزینه برای خرده‌فروشان برق، اعمال کرده‌اند. در مرجع (Richter and et al. 1998) برای انتخاب استراتژی پیشنهاد مناسب، از پیش‌بینی قیمت و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. دیگر مقالات، روش‌های مبتنی بر برنامه‌نویسی ریاضی را برای اجرای اشکال مختلف پیشنهاد سمت تقاضا در بازار برق ارائه کرده‌اند (Conejo and et al, 2002 Contreras) بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد روش‌هایی که تاکنون برای بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه مجازی ارائه شده است دارای برخی نواقص و ضعف‌ها می‌باشند. در زیر برخی از مهمترین این ضعف‌ها بررسی شده است.

- تمامی عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته نشده است.
- استفاده از پاسخ گویی بار می‌تواند به بهینه‌سازی هر چه بیشتر نیروگاه مجازی کمک کند.
- مدل‌سازی خودروهای الکتریکی به صورت دقیق انجام نشده است.
- عدم استفاده از خودروهای الکتریکی به عنوان ذخیره‌ساز

الکتریکی

تأثیر خودروهای الکتریکی بر شبکه‌های توزیع، در مطالعات متعدد بررسی شده است. در مرجع (Steen and et al. 2012) تحقیقی به منظور بررسی سه روش برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع انجام شده است. شارژ و دشارژ کنترل نشده، حداقل هزینه شارژ و استراتژی‌های حداقل تلفات توان برای نمایش سود کاربردهای مدیریت شده خودروهای الکتریکی مقایسه شده است. نویسندگان مرجع (Linni and etl 2013)، یک خانه هوشمند را بررسی کرده و برای بهبود واریانس بار خانگی با استفاده از دو خودروی الکتریکی هیبرید پلاگاین شخصی ساکنان تلاش کرده‌اند. در مرجع (Yifeng and et al. 2012) استراتژی‌های برنامه‌ریزی بهینه کلی و محلی برای خودروهای الکتریکی مقایسه شده است. در مرجع (Sundstrom and et al. 2012) نویسندگان روشی جدید برای در نظر گرفتن حدود ولتاژ و توان برای برنامه‌ریزی بهینه خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع ارائه کرده و نتایج را با برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن حدود در مدل مقایسه کرده‌اند.



شکل (۱): نمونه از توزیع آماری زمان خروج انواع خودروهای الکتریکی از پارکینگ در طول یک شبانه‌روز

برای مدل‌سازی مسافت طی شده در هر ساعت نیز می‌توان مشابه حالت قبل از توزیع آماری مسافت طی شده توسط خودروهای الکتریکی استفاده کرد. نمایش بلوکی الگوریتم پیشنهادی تولید سناریو برای رفتار خودروهای الکتریکی در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که در مرحله اول لازم است داده‌های مورد نیاز مسئله به صورت یک پایگاه داده به الگوریتم مورد نظر داده شود. این داده‌ها که در کادر پایین شکل (۲) نیز آورده شده است عبارتند از:

- حالت اولیه شارژ باتری
- پله شبیه‌سازی (سی دقیقه یا یک ساعت)
- کل پله‌های شبیه‌سازی
- تعداد خودروهای الکتریکی
- راندمان باتری خودروهای الکتریکی
- حداکثر عمق دشارژ خودروها
- توزیع آماری سفر خودروهای الکتریکی در هر ساعت
- راندمان سیستم شارژ
- ظرفیت باتری
- میانگین سرعت خودروهای الکتریکی
- نرخ شارژ خودروهای الکتریکی

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، برای مدل‌سازی رفتار خودروهای الکتریکی از دو ماژول مختلف استفاده شده است که عبارتند از:

- ماژول ۱: محاسبه مسافت طی شده برای هر خودرو الکتریکی
- ماژول ۲: سناریوهای تولید شده

- در نظر گرفتن عدم قطعیت رفتار خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده نظیر انرژی باد و خورشید.
- استفاده از پاسخ‌گویی بار که مدل‌سازی آن بر مبنای پاسخ‌گویی مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی و مبتنی بر تشویق برای خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- مدل‌سازی دقیق رفتار خودروهای الکتریکی بر اساس اطلاعات واقعی.
- استفاده همزمان از برنامه پاسخ‌گویی بار و خودروهای الکتریکی به منظور بیشینه‌سازی سود نیروگاه مجازی.

۲- مدل‌سازی عدم قطعیت رفتار خودروهای الکتریکی

در این بخش الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی عدم قطعیت خودروهای الکتریکی توضیح داده می‌شود. این الگوریتم امکان تولید سناریوهای مختلف برای رفتار خودروهای الکتریکی در نیروگاه مجازی، ریزشبکه یا شبکه‌های توزیع را فراهم می‌کند. در این مقاله از این الگوریتم برای مدل‌سازی عدم قطعیت رفتار تعداد زیادی خودرو الکتریکی استفاده شده است. برای این کار در ابتدا لازم است پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم توضیح داده شود. این پارامترها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- پارامترهای کلی
 - پارامترهای سفر
 - پارامتر نوع و کلاس خودروهای الکتریکی
 - پارامتر مدل مشخص خودروهای الکتریکی
- برای شبیه‌سازی شرایط واقعی خودروهای الکتریکی می‌توان از توزیع آماری سفر خودروها در هر دوره استفاده کرد. برای مثال در شکل (۱) نمونه‌ای از توزیع آماری زمان خروج انواع مختلف خودروهای الکتریکی از پارکینگ نشان داده شده است. این منحنی توسط دپارتمان حمل و نقل آمریکا تهیه شده است (Santos, 2009 Kenworthy, 2009). در این مقاله از توزیع آماری نشان داده شده در شکل (۱) برای مدل‌سازی عدم قطعیت رفتار خودروهای الکتریکی استفاده شده است.

جدول (۲): پارامترهای کلاس و نوع خودرو

| پارامتر | تعریف |
|--------------------|--|
| کلاس خودروها | مشخص کردن کلاس خودروهای الکتریکی موجود در شبکه |
| توزیع کلاس خودروها | توزیع هر یک از کلاس‌های خودروهای الکتریکی |
| نوع خودروها | مشخص کردن نوع خودروهای الکتریکی موجود در شبکه |
| توزیع نوع خودروها | توزیع آماری هر نوع از خودروهای الکتریکی |

مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح که برای محاسبه تعداد خودروهای هر کلاس استفاده شده است به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\min f = \sum_{i=1}^{modelNum} x_i \times 0 \quad (1)$$

قیدهای بهینه‌سازی مورد نظر نیز به صورت روابط (۲) الی (۳) بیان می‌شوند که هدف اصلی بهینه‌سازی مورد نظر، محقق شدن این قیدها است.

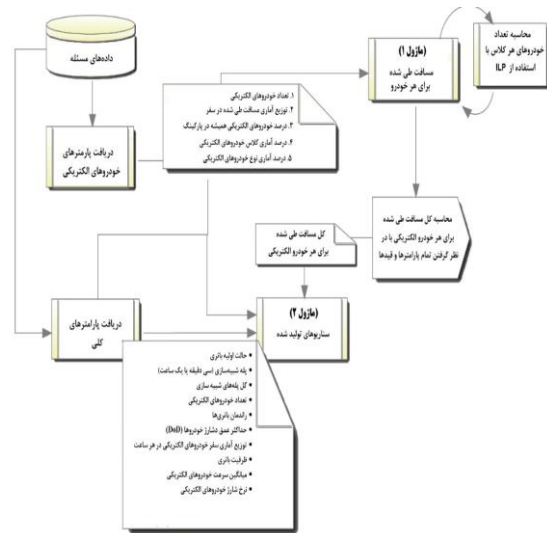
$$\sum_{i=1}^{modelNum} x_i = evNum \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{techTypesNum} \sum_{i \in techTypeSet_j} x_i = evNum \times techWeight_j \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{classesNum} \sum_{i \in classesSet_j} x_i = evNum \times classesWeight_k \quad (4)$$

متغیرهای استفاده شده در روابط (۱) الی (۴) در زیر توضیح داده شده است.

- Classes Num تعداد کلاس‌های موجود برای خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- Classes Set_j مجموعه i امین نوع از کلاس j خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- Classes Weigh_j وزن کلاس j بوده و بر اساس درصد تعریف می‌شود.



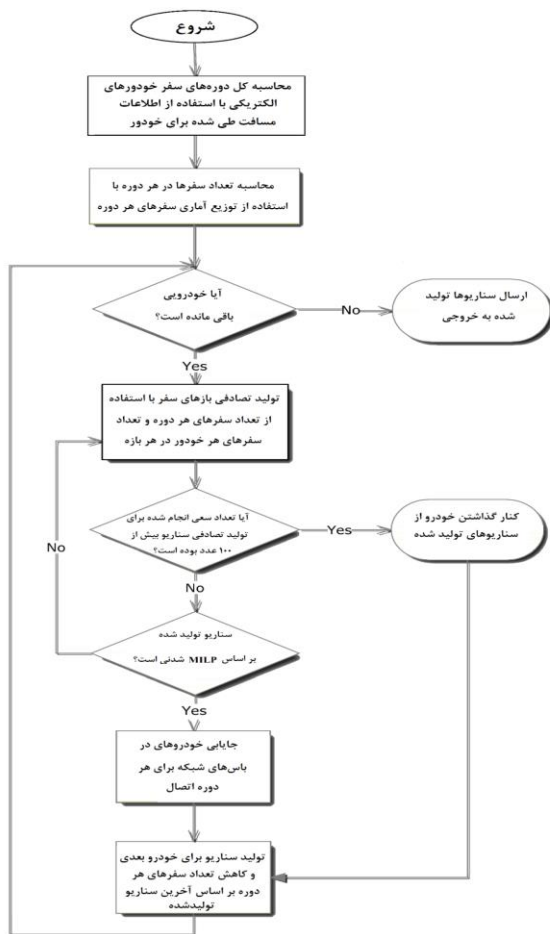
شکل (۲): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی رفتار

خودروهای الکتریکی

در ماژول ۱ یعنی محاسبه مسافت طی شده برای هر خودرو، یک زیر ماژول برای محاسبه تعداد خودروهای هر مدل وجود دارد. این زیر ماژول تحقق پارامترهای تعریف شده توسط کاربر را تضمین کرده و برای این کار، از فرمول‌بندی ریاضی به صورت برنامه‌ریزی خطی صحیح استفاده شده است. تابع هزینه این برنامه‌ریزی اهمیت نداشته و می‌تواند به صورت حداکثرسازی یا حداقل‌سازی یک تابع تعریف شود. به عبارت دیگر، دلیل استفاده از برنامه‌ریزی صحیح در زیر ماژول ۱، تضمین برآورده شدن قیدهای مسئله است. این قیدها به پارامترهای تنظیم شده توسط کاربر بستگی دارد. این زیر ماژول تعداد خودروهای هر مدل را بر اساس کلاس‌بندی‌ها و نوع خودروهای در دسترس تعیین می‌کند. در جدول (۱) و (۲) به ترتیب پارامترهای مسئله که به وسیله کاربر تنظیم می‌شود و همچنین پارامترهای نوع و کلاس خودروهای الکتریکی آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای سفر خودروهای الکتریکی

| پارامتر | تعریف |
|---------------------------|--|
| توزیع تعداد سفر برای دوره | توزیع سفرهای انجام شده توسط خودروهای الکتریکی برای هر دوره |
| توزیع مسافت طی شده | توزیع مسافت طی شده در هر سفر برای خودروهای الکتریکی |



شکل (۳): الگوریتم پیشنهادی برای تولید سناریو

در این الگوریتم، دوره‌های مسافرت با استفاده از مسافت طی شده هر یک از خودروهای الکتریکی که از ماژول ۱ بدست آمده‌است محاسبه می‌شود. این مقدار متناسب با تعداد دوره‌هایی است که هر خودرو الکتریکی با هدف سفر، از شبکه (سیستم شارژ) جدا می‌شود. به عنوان مثال اگر فاصله بدست آمده در ماژول ۱ برای خودرو اول و دوم به ترتیب ۱۰ و ۵۰ کیلومتر باشد و میانگین سرعت خودرو الکتریکی (که بر اساس مدل خودرو الکتریکی بدست می‌آید) برای هر دو خودرو نیز ۳۵ کیلومتر در ساعت فرض شود، بنابراین با فرض بازه شبیه‌سازی یک ساعتی، دوره مسافرت برای خودرو اول برابر ۱ و برای خودرو دوم برابر ۲ خواهد بود. این مقادیر با تقسیم مسافت طی شده بر سرعت میانگین و محاسبه سقف این مقدار به یک عدد صحیح بدست می‌آید. اگر مسافت طی شده توسط خودرو ۱ برابر ۳۵ کیلومتر و میانگین سرعت آن نیز ۳۵ کیلومتر بر ساعت باشد، تعداد دوره‌های مسافرت آن برابر ۱ خواهد بود، با این وجود برای این دو حالت، میزان انرژی مصرفی در طول زمان قطع از شبکه متفاوت خواهد بود. در این مرحله، تنها تعداد دوره‌های سفر (دوره‌هایی که خودرو از شبکه یا سیستم شارژ جدا می‌باشد) برای هر خودرو الکتریکی در دست می‌باشد.

- $Ev\ Num$ تعداد کل خودروهای الکتریکی بوده و تمام مدل‌ها را شامل می‌شود.
- $Model\ Num$ تعداد کل مدل‌های در دسترس برای خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- $Tech\ Types\ Num$ تعداد کل تکنولوژی‌های در دسترس برای خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- $Tech\ Type\ Set_j$ مجموعه مدل i که متعلق به ژامین نوع j خودروهای الکتریکی می‌باشد.
- $Tech\ Weight_j$ ضریب وزنی تکنولوژی نوع j می‌باشد که به صورت درصد تعریف می‌شود.
- X_i یک متغیر صحیح بوده و نشان دهنده‌ی تعداد خودروهای نوع i است.

با استفاده از اطلاعات خروجی زیر ماژول ۱، ماژول ۱ می‌تواند کل مسافت طی شده برای هر خودرو الکتریکی را با استفاده از پارامترهای خودروهای الکتریکی و پارامترهای توزیع آماری مسافت طی شده توسط خودروهای الکتریکی محاسبه کند. همچنین در ماژول ۱، بر اساس پارامتری که توسط کاربر تنظیم می‌شود حالت تعدادی از خودروها همیشه در پارکینگ تعیین می‌شود (این خودروهای تمام روز در حالت پارک بوده و از پارکینگ خارج نمی‌شوند). به طور کلی در ماژول ۱ کل مسافت طی شده توسط هر یک از خودروهای الکتریکی محاسبه می‌شود.

فرآیند انجام شده در ماژول ۲ (تولید سناریو) به خروجی ماژول ۱ وابسته است. با استفاده از اطلاعات مسافت طی شده توسط هر خودرو، در ماژول ۲ سعی می‌شود که سناریوهای ممکن برای این اطلاعات تولید شود. فلوچارت الگوریتم استفاده‌شده در ماژول ۲ در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$E_{Charge}(t) = n_{SlowCharge} * P_{SlowChargeRate}(t) * X_t * \Delta cd + n_{fastCharge} * P_{FastChargeRate} * Y_t * \Delta cd, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(۱۰)

$$X_t + Y_t + Z_t \leq 1, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(۱۱)

پارامترهای استفاده شده در روابط بالا به صورت زیر می‌باشند:

- Δcd مدت زمان شارژ برای $\Delta t = 1$ می‌باشد.
- $n_{slowCharge}$ راندمان شارژ در حالت شارژ آهسته می‌باشد.
- $n_{fastCharge}$ راندمان شارژ در حالت شارژ سریع می‌باشد.
- bat Cap ظرفیت باتری خودرو الکتریکی می‌باشد.
- $E_{Charge}(t)$ انرژی شارژ شده در دوره t می‌باشد.
- $E_{Stored}(t)$ انرژی ذخیره شده در باتری در بازه t
- $E_{Trip}(t)$ انرژی مصرف شده در سفر برای بازه t
- $initialBatState$ حالت شارژ اولیه باتری
- $P_{FastChargeRate}(t)$ نرخ شارژ سریع در دوره t
- $P_{SlowChargeRate}(t)$ نرخ شارژ آهسته در دوره t
- T تعداد دوره‌های شبیه‌سازی
- X_t متغیر باینری برای شارژ آهسته در دوره t
- Y_t متغیر باینری شارژ سریع در دوره t
- Z_t متغیر باینری برای حالت شارژ (برابر صفر) یا حالت سفر (برابر ۱)

در پایان این مدل‌سازی، حالت خودرو (در پارکینگ یا در سفر) و میزان انرژی مصرفی خودرو در هر ساعت مشخص می‌شود.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر

ماهیت تصادفی بودن توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی باد، چالش‌های بزرگی را در زمینه بهره‌برداری و کنترل شبکه‌های برق ایجاد می‌کند. برای حل این مسئله، لازم است عدم قطعیت توان خروجی این منابع در زمان برنامه‌ریزی بهینه نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده و مدل‌سازی شود. توان خروجی منابع فتوولتائیک شدیداً به تابش خورشید وابسته است. برای هر دوره زمانی، تابش خورشید به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که از توزیع بتا پیروی

در مرحله بعد الگوریتم، تعداد سفرهایی که در هر دوره رخ می‌دهد با استفاده از اطلاعات دوره‌های سفر و توزیع آماری سفر خودروها در هر دوره محاسبه می‌شود. نتیجه این محاسبه یک بردار است که سناریوهای بدست آمده برای تعداد سفرها در هر دوره را نشان می‌دهد. در ادامه، با استفاده از تعداد سفرها در هر دوره، الگوریتم دوره‌های مختلف سفر را مشخص می‌کند. به عنوان مثال، اگر خودرو ۲ دارای دو دوره سفر باشد، الگوریتم این دو دوره را به صورت تصادفی در دوره‌های در دسترس قرار می‌دهد. برای مثال این دوره‌ها برای یک بازه ۲۴ ساعته با پله یک ساعتی می‌توانند در ساعات ۸ و ۱۸ قرار گیرند. با این کار باید پارامتر توزیع آماری سفرها در هر دوره محقق شود. در نهایت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط، امکان‌سنجی سناریو تولید شده برای قطع خودرو از شبکه بررسی می‌شود.

برای جلوگیری از کاهش عمر باتری خودروهای الکتریکی، لازم است تابع هدف تعریف شده استفاده از شارژ سریع را حداقل سازد. اگر یک جواب شدنی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط بدست آید، سناریو بدست آمده برای قطع خودرو از شبکه قابل قبول بوده و در غیر این صورت، یک سناریو دیگر به صورت تصادفی تولید می‌شود. اگر سناریویی که مجدداً تولید شده است باز هم نشدنی باشد، خودرو مورد نظر از سناریوها کنار گذاشته می‌شود. فرمول ریاضی برای بررسی عملی بودن سناریو به صورت رابطه (۵) تعریف شده است.

$$\min f = \sum_{t=1}^T Y_t$$

(۵)

قیدهای این تابع هدف به صورت روابط زیر تعریف می‌شود:

$$E_{Stored}(t) = initialBatState, \text{ with } t = 0$$

(۶)

$$E_{Stored}(t) = E_{Stored}(t-1) + E_{Charge}(t-1) - E_{Trip}(t-1), \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(۷)

$$E_{Trip}(t) * Z_t - E_{Stored}(t) \leq 0$$

(۸)

$$E_{Stored}(t) \leq batCap, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(۹)

۴- پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت

در این مقاله برای مشارکت دادن بارهای نیروگاه مجازی در پاسخگویی بار، از برنامه‌های مبتنی بر قیمت استفاده شده است. با توجه به مشخصه‌های بار نیروگاه مجازی، ساعات یک روز به دوره‌های پیک، دوره‌های دره و دوره‌های مسطح تقسیم می‌شود. به منظور دستیابی به اهداف؛ کاهش پیک‌بار، پر کردن دره (ساعات کم‌باری) و همچنین متعادل کردن بار، در دوره‌های دره قیمت انرژی کاهش یافته و در دوره‌ها پیک قیمت افزایش می‌یابد تا مصرف توان در سمت تقاضا تغییر کرده و بخشی از بار از دوره‌های پیک به دوره‌های دره منتقل شود. در این شرایط، تعادل بار جدید به صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$D(L,t) = d(L,t) + d_{up}(L,t) - d_{do}(L,t) \quad (17)$$

در این رابطه، $d(L,t)$ مقدار پیش‌بینی شده برای توان مصرفی بار L در زمان t بوده و $D(L,t)$ مقدار توان مصرفی بار L پس از اجرای قیمت‌گذاری است. متغیرهای $d_{do}(L,t)$ و $d_{up}(L,t)$ نیز به ترتیب مقدار توان مصرفی افزایش یافته و توان مصرفی کاهش یافته برای بار L در زمان t و در پاسخ به تغییر قیمت انرژی می‌باشند. توان مصرفی بار در هر ساعت می‌تواند افزایش یا کاهش یابد، با این وجود، مجموع توان مصرفی بار در طول دوره بهینه‌سازی باید ثابت باقی بماند. این قید به صورت رابطه (۱۸) قابل بیان است.

$$\sum_{t=1}^T d_{up}(L,t) = \sum_{t=1}^T d_{do}(L,t) \quad (18)$$

در این رابطه، T مدت زمان دوره بهینه‌سازی است که برای یک شبانه‌روز از یک الی ۲۴ ساعت را شامل می‌شود. به طور مشابه، تنظیمات بار رنج مشخصی داشته و تنها بخشی از بارها در پاسخگویی مبتنی بر قیمت شرکت می‌کنند؛ بنابراین حد بالا و پایین متغیرهای $d_{do}(L,t)$ و $d_{up}(L,t)$ باید محدود شود. این کار بر اساس روابط (۲۲-۱۹) انجام می‌شود.

$$B_{up}(L).d(L,t) \geq d_{up}(L,t) \geq 0 \quad (19)$$

$$B_{do}(L).d(L,t) \geq d_{do}(L,t) \geq 0 \quad (20)$$

می‌کند (2013 Ai and et al.) بنابراین توان خروجی فتوولتائیک نیز از توزیع بتا پیروی خواهد کرد. با در نظر گرفتن توزیع بتا، تابع چگالی احتمال توان خروجی منابع فتوولتائیک به صورت رابطه زیر بدست می‌آید.

$$f(P^{PV}(t)) = \frac{1}{B(m_t, n_t)} \cdot \left(\frac{P^{PV}(t)}{P_{max}^{PV}(t)} \right)^{m_t-1} \cdot \left(1 - \frac{P^{PV}(t)}{P_{max}^{PV}(t)} \right)^{n_t-1} \quad (12)$$

$$B(m_t, n_t) = \frac{\Gamma(m_t) \cdot \Gamma(n_t)}{\Gamma(m_t) + \Gamma(n_t)} \quad (13)$$

$$m_t = \mu^{PV}(t) \cdot \left(\frac{\mu^{PV}(t) \cdot (1 - \mu^{PV}(t))}{\sigma_{PV}^2(t)} - 1 \right) \quad (14)$$

$$n_t = (1 - \mu^{PV}(t)) \cdot \left(\frac{\mu^{PV}(t) \cdot (1 - \mu^{PV}(t))}{\sigma_{PV}^2(t)} - 1 \right) \quad (15)$$

در این روابط $B(m,n)$ تابع بتا برای شدت تابش خورشید با پارامترهای m_t و n_t می‌باشد. پارامتر μ مقدار متوسط و σ واریانس شدت تابش خورشید می‌باشد. به طور مشابه، برای هر دوره زمانی فرض می‌شود که سرعت تصادفی باد از توزیع ویبول پیروی می‌کند (2013 Khatod). توان خروجی توربین بادی شدیداً به سرعت باد وابسته است. بنابراین توان خروجی توربین بادی نیز از توزیع ویبول پیروی خواهد کرد. تابع چگالی احتمال برای توان خروجی توربین بادی به صورت رابطه (۱۶) در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه، k و l به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر شکل توزیع ویبول می‌باشند.

$$f(P^{WT}(t)) = \frac{k_t}{l_t} \cdot \left(\frac{P^{WT}(t)}{l_t} \right)^{k_t-1} \cdot e^{-\left(\frac{P^{WT}(t)}{l_t} \right)^{k_t}} \quad (16)$$

در رابطه فوق متغیرهای $P_{DG}(DG,t)$ و $C_{DG}(DG,t)$ به ترتیب توان تولیدی و هزینه توان واحد منابع تولید پراکنده در زمان t می‌باشند. N_{DG} نیز تعداد منابع تولید پراکنده در دسترس است. دومین بخش از تابع هزینه مربوط به هزینه توان دریافتی از شبکه اصلی است متغیرهای $P_G(t)$ و $C_G(t)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان دریافتی از شبکه اصلی و تعرفه خرید انرژی از شبکه در زمان t هست. در صورتی که نیروگاه مجازی در زمان t به شبکه اصلی توان تزریق کند، مقدار $P_G(t)$ منفی شده و موجب کاهش هزینه تأمین انرژی نیروگاه مجازی خواهد شد. سومین بخش از تابع هزینه مربوط به هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی است. متغیرهای $P_{Discharge}(V,t)$ و $C_{Discharge}(t)$ به ترتیب توان دشارژ و قیمت این توان در زمان t هست. همچنین متغیرهای $P_{Charge}(V,t)$ و $C_{Charge}(t)$ نیز به ترتیب توان شارژ و قیمت این توان در زمان t می‌باشند. تعداد کل خودروهای الکتریکی نیز با N_V نشان داده شده است. در برخی ساعات ممکن است تمام توان موردنیاز بار دسترس نباشد و لازم باشد مقداری از بارهای قابل قطع تحت عنوان برنامه پاسخ‌گویی بار قطع شود؛ بنابراین لازم است هزینه توان تغذیه نشده نیز در نظر گرفته شود.

در رابطه بالا، متغیرهای $P_{IL}(L,t)$ و $C_{IL}(L,t)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان تغذیه نشده برای بار L و قیمت این توان در زمان t می‌باشند. N_{IL} نیز نشان‌دهنده‌ی تعداد بارهای قابل قطع است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این مقاله پاسخ‌گویی بار خودروهای الکتریکی به صورت کاهش سفر و تغییر زمان سفر در نظر گرفته شده است. برای این کار با صاحبان خودروهای الکتریکی قرارداد بسته می‌شود تا در قبال پذیرش کاهش و تغییر زمان سفر در زمان‌های لازم، به آن‌ها پاداش پرداخت شود؛ بنابراین پاسخ‌گویی بار با روش بیان شده دارای هزینه هست که این هزینه پاداشی است که باید به صاحبان خودروهای الکتریکی پرداخت شود؛ بنابراین قسمت آخر تابع هزینه مربوط به هزینه پاسخ‌گویی خودروهای الکتریکی هست. در رابطه بالا $E_{TripRed}(V,t)$ و $C_{TripRed}(V,t)$ به ترتیب مقدار انرژی کاهش یافته ناشی از کاهش سفر خودرو V و قیمت این انرژی در زمان t می‌باشند. با ضرب این دو متغیر، مقدار هزینه‌ای که باید به صاحب خودرو الکتریکی پرداخت شود به دست می‌آید. $Z(V)$ یک متغیر باینری است که تغییر زمان سفر برای خودرو V را نشان می‌دهد. $C_{Shift}(V)$ نیز قیمت تغییر زمان سفر برای خودرو V هست. همان‌طور که در بخش‌های مختلف تابع هزینه نشان داده شده تابع هزینه بر اساس زمان تعریف شده است. بازه زمانی برنامه‌ریزی اختیاری بوده و می‌تواند برای هر روز به ۲۴ قسمت تقسیم شود که در این حالت هر بازه زمانی یک ساعت را شامل می‌شود. بهینه‌سازی موردنظر باید با در نظر گرفتن قیدهای منابع و سایر قیدهای بهره‌برداری انجام شود. یکی از مهم‌ترین قیدها که برای عملکرد پایدار سیستم لازم است، تعادل توان تولیدی و مصرفی هست. قید تعادل توان تولیدی و مصرفی به صورت رابطه (۲۴) تعریف شده است.

$$d_{up}(L,t) \geq \varepsilon_{up}(L) \cdot d(L,t) \left(1 - \frac{\Pr(t)}{\Pr_{ref}} \right) \quad (21)$$

$$d_{do}(L,t) \geq \varepsilon_{do}(L) \cdot d(L,t) \left(\frac{\Pr(t)}{\Pr_{ref}} - 1 \right) \quad (22)$$

در این روابط، $B_{do}(L)$ و $B_{up}(L)$ حداکثر مقدار تغییرات مجاز بار L می‌باشند که حد بالای انتقال بار را تعیین می‌کنند. پارامترهای $\varepsilon_{up}(L)$ و $\varepsilon_{do}(L)$ نیز ضرایب الاستیسیته بار L هستند که حد پایین انتقال بار را مشخص می‌کنند. $\Pr(t)$ تعرفه‌ی انرژی در زمان t بوده و \Pr_{ref} نیز تعرفه‌ی مرجع هست. بر اساس رابطه (۱۷)، در هر زمان تنها یکی از نامعادله‌های (۲۱) و (۲۲) اعمال می‌شود.

۵- برنامه‌ریزی بهینه نیروگاه مجازی

در این بخش چگونگی فرمول‌بندی ریاضی مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی میزان توان تولیدی منابع پراکنده، شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و پاسخ‌گویی بار ارائه شده است به صورتی که امکان بهره‌برداری بهینه از نیروگاه مجازی فراهم شود. مسئله موردنظر به صورت یک برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط فرمول‌بندی و حل می‌شود. در مدل ارائه شده، هدف مدیریت منابع انرژی برای روز بعد هست. منابع انرژی نیروگاه مجازی موردنظر شامل خودروهای الکتریکی، انواع مختلف منابع تولید پراکنده از نوع واحدهای توزیع‌پذیر نظیر میکرو توربین و واحدهای غیرقابل توزیع نظیر فتوولتائیک و توربین بادی و بارهای پاسخ‌گو می‌باشند. نیروگاه مجازی همچنین قادر به تبادل انرژی با شبکه اصلی نیز هست؛ بنابراین بهره‌بردار نیروگاه مجازی قادر است بارها را با استفاده از توان تولیدی منابع تولید پراکنده، دشارژ خودروهای الکتریکی و خرید توان از شبکه اصلی تأمین کند. همچنین می‌تواند توان مازاد را به شبکه اصلی بفروشد. این کار به صورتی برنامه‌ریزی می‌شود که سود نیروگاه مجازی بیشینه شود. برای بهینه‌سازی شرایط بهره‌برداری نیروگاه مجازی، لازم است تابع هزینه ارائه شده در رابطه (۲۳) کمینه‌سازی شود.

$$f = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{DG=1}^{N_{DG}} [P_{DG}(DG,t) \times C_{DG}(DG,t)] + P_G(t) \times C_G(t) + \sum_{V=1}^{N_V} [P_{Discharge}(V,t) \times C_{Discharge}(V,t) - P_{Charge}(V,t) \times C_{Charge}(V,t)] + \sum_{L=1}^{N_{IL}} P_{IL}(L,t) \times C_{IL}(L,t) + \sum_{V=1}^{N_V} E_{TripRed}(V,t) \times C_{TripRed}(V,t) + \sum_{V=1}^{N_V} Z(V) \times C_{Shift}(V) \right] \times \Delta t \quad (23)$$

- سناریو ۱: شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی متصل به شبکه
- سناریو ۲: شارژ و دشارژ هوشمند به همراه کاهش یا تغییر زمان سفر

$$\sum_{DG=1}^{N_{DG}} P_{DG}(DG, t) + \sum_{L=1}^{N_{IL}} P_{IL}(L, t) + \sum_{V=1}^{N_V} (P_{Discharge}(V, t) - P_{Charge}(V, t)) + P_G(t) = \sum_{L=1}^{N_L} D(L, t) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(۲۴)

در شبیه‌سازی انجام شده، هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به ترتیب ۷۰ و ۹۰ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده‌است. هزینه کاهش انرژی شارژ ناشی از کاهش یا تغییر زمان سفر نیز ۵۰ دلار بر مگاوات در نظر گرفته شده‌است. بنابراین مشخص است که خودروهای الکتریکی از شرکت در پاسخ‌گویی بار سود برده و به این کار تشویق می‌شوند. هزینه قطع بار ۲۰۰ دلار بر مگاوات ساعت و حداکثر مقدار مجاز برای کاهش سفر خودروهای الکتریکی نیز ۳۰ درصد در نظر گرفته شده‌است.

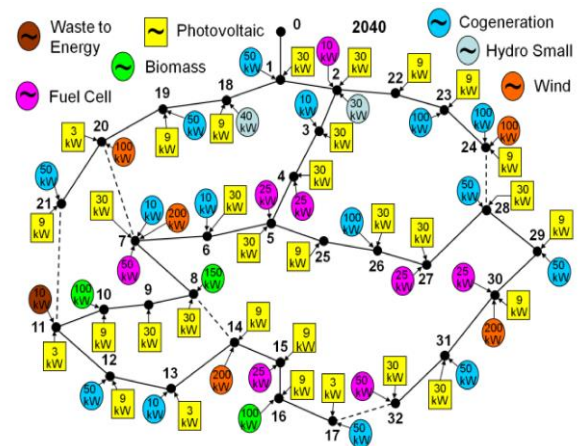
برای تمام سناریوها، تابع هزینه شامل هزینه تامین انرژی و میزان انتشار آلودگی می‌باشد که این دو هدف، با استفاده از ضرایب وزنی به یک تابع هزینه کلی تبدیل شده‌است. ضرایب وزنی توابع هدف یعنی ω_1 و ω_2 به ترتیب ۰.۹ و ۰.۱ تنظیم شده‌است. لازم به ذکر است که مقدار این ضرایب وزنی بستگی به نظر بهره‌بردار نیروگاه مجازی و میزان اهمیت مسائل مالی و مسائل زیست محیطی دارد.

۷-۱ نتایج سناریو ۱

در این سناریو علاوه بر شارژ هوشمند و پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی، خودروهای الکتریکی دارای قابلیت متصل به شبکه بوده و با شرکت در پاسخ‌گویی بار به بهره‌بردار شبکه اجازه می‌دهند که در ساعات پیک مقداری از انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروها را دشارژ کند و در قبال این کار پاداش دریافت می‌کنند که این پاداش بر اساس اختلاف قیمت انرژی شارژ و دشارژ باتری خودروهای الکتریکی محاسبه می‌شود. در جدول (۳) مقادیر بدست آمده برای توابع هزینه برای دو حالت مختلف آورده شده‌است. برای این سناریو، میزان هزینه پرداختی بابت دشارژ خودروهای الکتریکی ۸۵ دلار شده‌است که این مقدار نیز در مقدار هزینه انرژی لحاظ شده‌است. بنابراین به طور کلی استفاده از قابلیت دشارژ خودروهای الکتریکی موجب کاهش هزینه تامین انرژی شده‌است. نکته مهم دیگر آن است که استفاده همزمان از استراتژی دشارژ خودروهای الکتریکی و پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت، موجب کاهش بیش از پیش هزینه و انتشار آلودگی نیروگاه مجازی شده‌است.

۶- شبکه ی مورد مطالعه

نیروگاه مجازی مورد مطالعه در این مقاله، یک سیستم ۳۲ شینه ۱۲.۶۶ کیلوولت هست. ساختار این نیروگاه مجازی که برای سال ۲۰۴۰ پیش‌بینی شده است در شکل ۴ نشان داده شده است. این نیروگاه مجازی دارای ۲۱۸ مصرف‌کننده هست که پیک مصرف آن‌ها ۴.۲ گیگاوات است. جزئیات مربوط به بارهای این سیستم در (2013 Ai) ارائه شده است.



شکل (۴): ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه (2013 Faria)

نیروگاه مجازی مورد مطالعه دارای ۶۶ تولید پراکنده است که ظرفیت نامی هر یک از منابع بر روی آن‌ها نوشته شده است. نیروگاه مجازی مورد نظر دارای ۱۰ تأمین‌کننده توان نیز هست که توان را از شبکه اصلی خریداری کرده و به نیروگاه مجازی می‌فروشند. برای شبیه‌سازی از پله زمانی یک ساعت استفاده شده و شبیه‌سازی برای یک شبانه‌روز یا ۲۴ ساعت انجام شده است.

۷- نتایج شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه مجازی

در این بخش نتایج بدست آمده برای بهره‌برداری بهینه از نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و پاسخ‌گویی بار ارائه می‌شود. برای شبیه‌سازی دو سناریو زیر در نظر گرفته شده است:

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت موجب کاهش نیاز به دشارژ خودروهای الکتریکی شده‌است در حالی منحنی بار نسب به حالت قبل مسطح‌تر شده‌است. مطابق شکل‌های (۵) و (۶)، بدون استفاده از پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت استراتژی دشارژ در سه ساعت و با استفاده از پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت استراتژی دشارژ تنها در یک ساعت مورد استفاده قرار گرفته‌است. این موضوع کارایی بالای پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت را نشان می‌دهد.

۲-۷ نتایج سناریو ۲

در این سناریو علاوه بر شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت، کاهش و جابجایی زمان سفر خودروهای الکتریکی نیز در نظر گرفته شده‌است. مقدار توابع هزینه بدست آمده برای این سناریو، برای دو حالت مذکور در جدول (۴) نشان داده شده‌است. با مقایسه این جدول با جدول‌های قبلی مشخص است که استفاده از استراتژی کاهش و جابجایی زمان سفر خودروهای الکتریکی موجب کاهش هزینه و آلودگی می‌شود، به صورتی که نسبت به سناریو ۱، میزان هزینه ۳۲ دلار و میزان آلودگی ۲۶۴.۳ کیلوگرم کاهش یافته‌است. این موضوع به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از پاسخ‌گویی خودروهای الکتریکی به صورت کاهش سفر و همچنین جابجایی سفر، بهره‌برداری بهینه‌تر از نیروگاه مجازی را محقق می‌سازد.

جدول (۴): مقدار توابع هزینه برای سناریو دوم

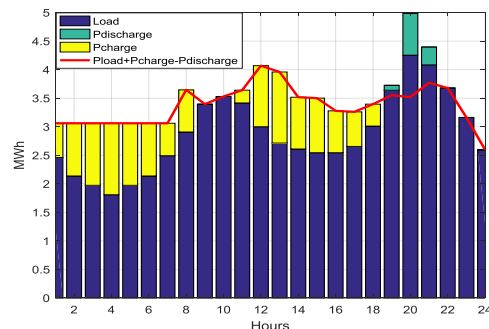
| تابع هزینه | بدون پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت | با پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| هزینه انرژی (دلار) | ۶۳۵۴ | ۶۳۴۸ |
| آلودگی (کیلوگرم) | ۳۶۸۷۶ | ۳۶۷۸۹ |
| کلی | ۹۴۰۶.۲ | ۹۳۹۲ |

برای این سناریو مقدار توان مورد نیاز خودروهای الکتریکی و مقدار انرژی کاهش یافته به دلیل کاهش سفر و جابجایی زمان شارژ در شکل (۷) نشان داده شده‌است. در این شکل منحنی پایینی میزان توانی را نشان می‌دهد که با کاهش سفر و تغییر زمان سفر خودروها، نیازی به مصرف آن نیست. بر اساس این شکل مشخص است در ساعاتی که خودروهای الکتریکی به شارژ بیشتری نیاز داشته‌اند، کاهش سفر و جابجایی سفر موجب کاهش انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی شده‌است. در شکل (۸) و (۹) توان مصرفی بار، توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی برای دو حالت مختلف نشان داده شده‌است.

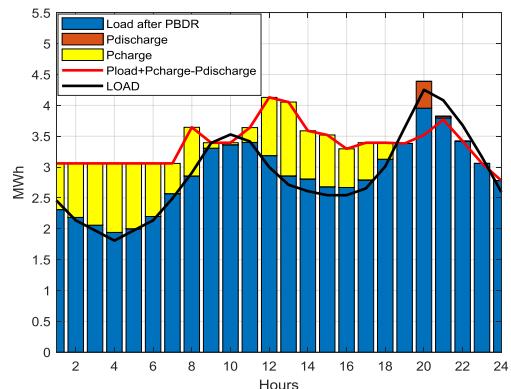
جدول (۳): مقدار توابع هزینه برای سناریو اول

| تابع هزینه | بدون پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت | با پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| هزینه انرژی (دلار) | ۶۳۹۱.۹۶۴ | ۶۳۸۰.۴۵ |
| آلودگی (کیلوگرم) | ۳۹۴۸۲.۶۱ | ۳۹۴۳۲ |
| تابع هزینه کلی | ۹۷۰۱.۰ | ۹۶۸۵.۶۲ |

برای سناریو ۱، توان مصرفی بارهای معمولی، توان لازم برای شارژ خودروها و توان دشارژ شده از خودروها در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌است. در شکل (۵) پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت در نظر گرفته نشده، ولی در شکل (۶)، پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت نیز در نظر گرفته شده‌است.

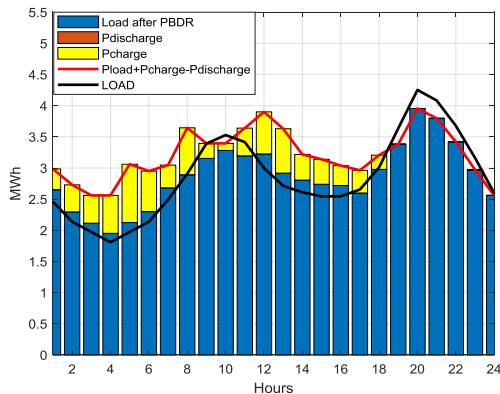


شکل (۵): توان مصرفی بار، توان شارژ و دشارژ خودرو الکتریکی و توان مصرفی کل برای سناریو ۱ بدون پاسخ‌گویی بارها



شکل (۶): توان مصرفی بار، توان شارژ و دشارژ خودرو الکتریکی و توان مصرفی کل برای سناریو ۱ با پاسخ‌گویی بارها

با توجه به شکل (۵) مشخص است که از استراتژی دشارژ خودروهای الکتریکی تنها در پیک بار استفاده شده‌است. همچنین مشخص است که استفاده از این قابلیت موجب مسطح‌تر شدن منحنی بار کلی نیروگاه مجازی شده‌است. از طرف دیگر بر اساس شکل (۶)، استفاده از



شکل (۹): توان مصرفی بار، توان شارژ و توان دشارژ خودروهای الکتریکی برای سناریو ۲ با پاسخ‌گویی بارها

مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد که استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی، نیاز به دشارژ خودروهای الکتریکی را به صورت کامل برطرف ساخته‌است. این موضوع بسیار حائز اهمیت می‌باشد. زیرا پیاده‌سازی و استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای بارهای معمولی به مراتب ساده‌تر از پیاده‌سازی استراتژی برای خودروهای الکتریکی می‌باشد. بنابراین مشخص است که استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت پتانسیل بسیار بالایی در بهبود شرایط بهره‌برداری از نیروگاه‌های مجازی دارد.

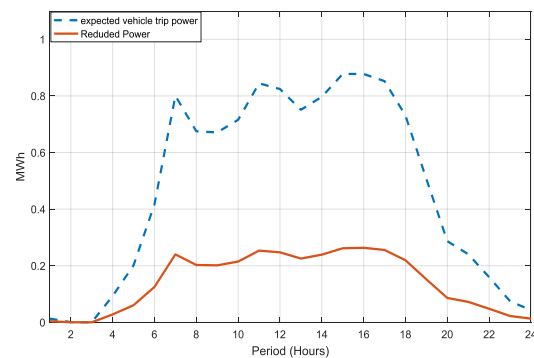
به طور کلی بر اساس نتایج بدست می‌توان گفت که استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و مشارکت خودروهای الکتریکی در این برنامه‌ها منجر به بهبود شرایط بهره‌برداری از نیروگاه‌های مجازی شده و علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری، موجب کاهش میزان آلاینده‌گی نیز می‌شود. علاوه بر این، استفاده از برنامه‌ها و استراتژی‌های مذکور موجب صاف شدن منحنی بار ساعتی نیروگاه مجازی شده‌است که عملکرد نیروگاه مجازی با قابلیت اطمینان بالاتر را محقق می‌سازد. بنابراین می‌توان گفت که پاسخ‌گویی بار یک ابزار قدرتمند برای بهره‌برداری بهینه‌تر از نیروگاه مجازی‌ها فراهم می‌سازد و مزایای فنی و اقتصادی بسیار زیادی به همراه دارد.

۸- نتیجه گیری

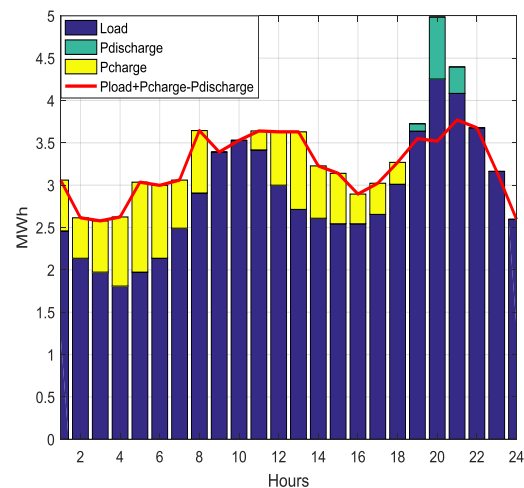
در این مقاله بهره‌برداری بهینه از یک نیروگاه مجازی از طریق برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق برای خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل با پرداخت تشویق، صاحبان خودروهای الکتریکی ترغیب به دشارژ باتری خودرو یا کاهش سفر در ساعات پیک بار شدند. برای جلوگیری از تأثیرات منفی حضور

اساس این شکل‌ها مشخص است که میزان توان شارژ خودروهای الکتریکی به طور کلی کاهش یافته‌است.

مقایسه شکل (۸) و (۹) با شکل‌های قبلی نشان می‌دهد که استفاده از کاهش و جابجایی زمان سفر خودروهای الکتریکی موجب کاهش نیاز به شارژ خودروهای الکتریکی در ساعات پیک بار می‌شود. این موضوع نیاز به منابع انرژی گران‌تر که معمولاً میزان آلودگی آنها بیشتر است را نیز کاهش می‌دهد که این موضوع با مقایسه مقدار توابع هزینه بدست آمده برای این سناریو با توابع هزینه سناریوهای قبلی مشخص است.



شکل (۷): میزان توان لازم برای شارژ و میزان توان کاهش یافته ناشی از کاهش یا جابجایی زمان سفر



شکل (۸): توان مصرفی بار، توان شارژ و توان دشارژ خودروهای الکتریکی برای سناریو ۲ بدون پاسخ‌گویی بارها

Samadi, P; Mohsenian-Rad, A, Schober, R, Wong, V, Jatskevich, J, (2010). Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid. In Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE International Conference, Pages 415-420.

Mohsenian-Rad, A. H; Wong, V. W, Jatskevich, J, Schober, R, Leon-Garcia, A, (2010). Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. Smart Grid, IEEE Transactions on, 1(3), Pages 320-331.

Adika, C. O; Wang, L, (2014). Demand-side bidding strategy for residential energy management in a smart grid environment. Smart Grid, IEEE Transactions on, 5(4), Pages 1724-1733.

Wen, F; David, A. K, (2001). Optimal bidding strategies for competitive generators and large consumers. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 23(1), Pages 37-43.

Herranz, R; Munoz San Roque, A, Villar, J, Campos, F. A, (2012). Optimal demand-side bidding strategies in electricity spot markets, IEEE Transactions on Power Systems, 27(3), Pages 1204-1213.

Richter Jr, C. W; Sheblé, G. B, (1998). Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies for the competitive market place, IEEE Transactions on Power Systems, 13(1), Pages 256-261.

Conejo, A. J; Nogales, F. J, Arroyo, J. M, (2002). Price-taker bidding strategy under price uncertainty, IEEE Transactions on Power Systems, 17(4), Pages 1081-1088.

Conejo, A. J; Contreras, J, Arroyo, J. M, De la Torre, S, (2002). Optimal response of an oligopolistic generating company to a competitive pool-based electric power market, IEEE Transactions on Power Systems, 17(2), Pages 424-430.

Steen, D; Tuan, LA, Carlson, O, Bertling, L, (2012). Assessment of electric vehicle charging scenarios based on demographical data. IEEE Trans Smart Grid, 3(3), Pages 1457-1468.

Linni, J; Honghong, X, Guoqing, X, Xinyu, Z, Dongfang, Z, Shao, ZY, (2013). Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid. IEEE Trans Ind Electron; 60(8), Pages 3218-3226.

Yifeng, H; Venkatesh, B, Ling, G, (2012). Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles. IEEE Trans Smart Grid, 3(3), Pages 1095-1105.

Sundstrom, O; Binding, C, (2012). Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints. IEEE Trans Smart Grid, 3(1), Pages 26-37.

Wu, D; Aliprantis, DC, Ying, L, (2011). On the choice between uncontrolled and controlled charging by owners of PHEVs. IEEE Trans Power Deliv, 26(4), Pages 2882-2884.

خودروهای الکتریکی بر شبکه‌های برق و بخصوص نیروگاه های مجازی، لازم است شارژ این خودروها بصورت کنترل شده و با برنامه‌ریزی دقیق انجام شود. برای رفع مشکلات مطرح شده، یک زمان‌بندی مناسب برای اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت برای بارهای معمولی به صورت همزمان با شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در حضور منابع تجدیدپذیر ارائه شد؛ به گونه‌ای که موجب کاهش هزینه تامین انرژی و همچنین کاهش میزان تولید گازهای گلخانه‌ای شد. مسئله بیان شده در این مقاله بصورت یک برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط مدلسازی و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. همچنین مدلسازی رفتار خودروهای الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار متلب حل شد که قادر بود با دقت قابل قبولی رفتار خودروهای الکتریکی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدلسازی کند. نشان داده شد که این مشارکت برای خود آنها نیز سودآور می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کار باعث صاف تر شدن پیک بار و در نتیجه آن، کاهش هزینه تامین انرژی و میزان تولید آلاینده‌گی می‌شود.

مراجع

Asmus, P, (2010). Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future, The Electricity Journal, 23(10), Pages 72-82.

Pedrasaa, MAA; Spoonerb, TD, MacGillb, IF, (2011). A novel energy service model and optimal scheduling algorithm for residential distributed energy resources, Electric Power Systems Research, 81(12), Pages 2155-2163.

Wencong, S; Mo-Yuen, C, (2012). Performance evaluation of an EDA-based large-scale plug-in hybrid electric vehicle charging algorithm, IEEE Trans Smart Grid, 3(1), Pages 308-315.

Tushar, W; Saad, W, Poor, HV, Smith, DB, (2012). Economics of electric vehicle charging: a game theoretic approach. IEEE Trans Smart Grid, 3(4), Pages 1767-1778.

Rahimi, F; Ipakchi, A, (2010). Demand response as a market resource under the smart grid paradigm. Smart Grid, IEEE Transactions on, 1(1), Pages 82-88.

Chu, C; Jong, T, Huang, Y, (2005). A direct load control of air-conditioning loads with thermal comfort control. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pages 664-669.

Herter, K, (2007). Residential implementation of critical-peak pricing of electricity. Energy Policy, 35(4), Pages 2121-2130.

Triki, C; Violi, A, (2009). Dynamic pricing of electricity in retail markets. 4OR, 7(1), Pages 21-36.

Xiong, G; Chen, C, Kishore, S, Yener, A, (2011). Smart (in-home) power scheduling for demand response on the smart grid. In Innovative smart grid technologies (ISGT), Pages 1-7.

- framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37(11), Pages 4379-4390.
- Han, S; Han, S, Sezaki, K, (2010). Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation. *Smart Grid*, IEEE Transactions on, 1(1), Pages 65-72.
- Santos, A; McGuckin, N, Nakamoto, H, Gray, D, Liss, S, (2009). Summary of Travel Trends National Household Travel Survey; Technical Report; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Washington, DC, USA.
- Kenworthy, J.R, (2009). Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger System: A case study of 84 Global Cities. In Proceedings of the Third Conference of the Regional Government Network for Sustainable Development, Notre Dame University, Fremantle, Australia.
- Ai, X; Xu, J. J, (2013). Study on the microgrid and distribution network cooperation model based on interactive scheduling, *Power Syst. Protect. Control*, 41(1), Pages 143-149.
- Khatod, D. K; Pant, V, Sharma, J, (2013). Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators, *IEEE Trans. Power Syst*, 28(2), Pages 683-695.
- Faria, P, (2013). Demand Response in future power systems management-A conceptual framework and simulation tool, Master degree thesis, School of Engineering - Polytechnic of Porto, Portugal.
- Saber, AY; Venayagamoorthy, GK, (2012). Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles. *Syst J IEEE*, 6(1), Pages 103-109.
- Pipattanasomporn, M; Kuzlu, M, Rahman, S, (2012). An algorithm for intelligent home energy management and demand response Analysis. *IEEE Trans Smart Grid*, 3(4), Pages 2166-2173.
- Nunna, H; Doolla, S, (2012). Demand response in smart distribution system with multiple microgrids. *IEEE Trans Smart Grid*, 3(4), Pages 1641-1649.
- Kempton, W; Tomi_c, J, (2005). Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. *J Power Sources*, 144(1), Pages 268-279.
- Sousa, T; Morais, H, Soares, J, Vale, Z, (2012). Day-ahead resource scheduling in smart grids considering vehicle-to-grid and network constraints. *Appl Energy*, 96, Pages 183-193.
- Battistelli, C; Baringo, L, Conejo, A, (2012). Optimal energy management of small electric energy systems including V2G facilities and renewable energy sources, *Electr Power Syst Res*; 92, Pages 50-59.
- Pang, C; Dutta, P, Kezunovic, M, (2012). BEVs/PHEVs as dispersed energy storage for V2B uses in the smart grid. *IEEE Trans Smart Grid*, 3(1), Pages 473-382.
- Sanchez-Martin, P; Sanchez, G, Morales-Espana, G, (2012). Direct load control decision model for aggregated EV charging points. *IEEE Trans Power Syst*; 27(3), Pages 1577-1584.
- Guille, C; Gross, G, (2009). A conceptual