بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه برق- قدرت

# تاثیر خودروهای هیبریدی متصل به شبکه در کنترل فرکانس در شبکه‌های هوشمند

**دانشجو : سحر رمضانی طلوتی**

استاد راهنما:

**دکتر مهدی بانژاد**

استاد مشاور:

**دکتر امین حاجی‌زاده**

**پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

بهمن ماه ۱۳۹۱

## تقدیم به پدر و مادرم:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب را به من آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

## تقدیم به همسرم:

به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و محبت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش برای من فراهم آورد. او که مهربانی‌اش سایه سار زندگیم است.و او که اسوه صبر و بردباری بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمودو مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند....

# تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از راهنمایی‌های ارزشمند استاد ارجمند **جناب آقای دکتر بانژاد** عمیقا تشکر نمایم. بی‌شک اتمام این پایان‌نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان‌پذیر نبود.همچنین از زحمات و راهنمایی‌های استاد گرانقدر **جناب آقای دکتر ماجی‌زاده** که همکاری و مساعدت لازم را مبذول داشتند کمال تشکر را دارم. و نیز از زحمات همسر عزیزم آقای مهندس امیر حسن‌نیا که در تمام مراحل این پایان نامه یاریگر من بودند کمال سپاسگزاری را به عمل می‌آورم.

# تعهد نامه

اینجانب **سحر رمضانی طلوتی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق- قدرت** دانشکده **مهندسی برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **تاثیر خودروهای هیبریدی متصل به شبکه در کنترل فرکانس در شبکه‌های هوشمند** تحت راهنمایی **دکتر مهدی بانژاد** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

**تاریخ:۱۳۹۱/۱۱/۲۸**

**امضای دانشجو**

**مالکیت نتایج و حق نشر**

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

# چکیده

امروزه نگرانی‌های مربوط به اتمام سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر و نیز آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه این منابع، به یکی از معضلات جوامع مدرن امروزی تبدیل شده است. در مواجه با این مساله، استفاده از انرژی‌های پاک و منابع تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از خودروهای برقی به جای خودروهای درونسوز، یکی از راهکارهای تکنولوژی مدرن در جهت حفظ منابع تجدیدناپذیر، کاهش آلودگی هوا و ... می‌باشد. علاوه بر این قابلیت‌های نوین ارتباطی در شبکه‌های هوشمند آینده، این امکان را فراهم خواهد ساخت تا از انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای برقی برای پشتیبانی شبکه‌های قدرت استفاده شود. خدماتی از قبیل هموارتر کردن منحنی بار شبکه، کنترل فرکانس سیستم، تامین ذخیره چرخان و ... در جهت پشتیبانی شبکه قدرت مورد توجه قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه، ابتدا امکان کنترل فرکانس یک شبکه قدرت کوچک با تجمیع و مدلسازی خودروهای برقی موجود در شبکه، بررسی شده است. مدیریت متمرکز خودروهای پراکنده در شبکه و برنامه‌ریزی برای استفاده موثر از شارژ مازاد بر نیاز موجود در باتری آنها، از مهم‌ترین مسائل مورد بحث متخصصین شبکه‌های هوشمند می‌باشد. حل این معضل تنها از طریق یک نهاد مستقل برای ارائه خدمات شارژ، تجمیع و مدیریت خودروها امکان‌پذیر خواهد بود. برنامه‌ریزی بهینه این نهاد برای کسب سود ماکزیمم بویژه در محیط تجدید ساختار یافته، از موضوعات مورد توجه محققین شبکه‌های هوشمند می‌باشد. بنابراین یک برنامه‌ریزی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کسب سود ماکزیمم توسط نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی از بازار ذخیره چرخان ارائه شده است. شبیه‌سازی و مطالعه موردی یک سیستم سه باسه، قابلیت خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه قدرت را تایید می‌کند و تاثیر تامین ذخیره چرخان با خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



**کلمات کلیدی:** خودرو برقی، کنترل فرکانس، برنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده، بازار ذخیره چرخان

## مقالات مستخرج از پایان نامه

[۱] سحر رمضانی طلوتی، مهدی بانژاد، امین حاجی‌زاده، **"برنامه‌ریزی بهینه نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی متصل به شبکه در محیط رقابتی"**، بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2012)، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، ۱۳۹۱.

[۲] سحر رمضانی طلوتی، مهدی بانژاد، امین حاجی‌زاده، **"بررسی قابلیت خودروهای برقی در کنترل فرکانس یک شبکه کوچک هوشمند"**، تحت بررسی در اولین کنفرانس ملی مهندسی سیستم‌های قدرت، ملایر، ایران، ۱۳۹۲.

# فهرست مطالب

**فصل اول- مقدمه** ..... ۱

**فصل دوم- معرفی ساختار و عملکرد خودروهای برقی** ..... ۵

۲-۱. چشم‌انداز تکنولوژی خودروهای برقی ..... ۷

۲-۲. انواع خودروهای برقی ..... ۹

۲-۳. مزایا و معایب خودروهای برقی ..... ۱۱

۲-۴. خودروهای برقی متصل به شبکه (V2G) ..... ۱۳

۲-۵. مشخصات باتری‌ها ..... ۱۶

۲-۶. قابلیت V2G در پشتیبانی شبکه در موارد مختلف ..... ۱۸

**فصل سوم- پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد خودروهای برقی درکنترل فرکانس** ..... ۲۴

۳-۱. کنترل فرکانس در شبکه‌های قدرت ..... ۲۶

۳-۲. مروری بر تحقیقات گذشته ..... ۳۰

**فصل چهارم- قابلیت خودروهای برقی درکنترل فرکانس شبکه‌های هوشمند** ..... ۳۶

۴-۱. تجمیع و مدلسازی خودروهای برقی در شبکه قدرت ..... ۳۸

۴-۲. شبیه‌سازی و مطالعه نمونه ..... ۳۸

۴-۳. مدلسازی سیستم نمونه ..... ۳۹

۴-۳-۱. ژنراتور سنکرون ..... ۳۹

۴-۳-۲. کنترل‌کننده ولتاژ و سیستم تحریک ..... ۴۱

۴-۳-۳. گاورنر و توربین ..... ۴۲
۴-۳-۴. خط انتقال ..... ۴۳
۴-۳-۵. بار الکتریکی ..... ۴۳
۴-۳-۶. V2G ..... ۴۳
۴-۳-۷. سناریوی اول- اتصال ناگهانی بار ..... ۵۲
۴-۳-۸. سناریوی دوم- قطع ناگهانی بار از شبکه قدرت ..... ۵۸
۴-۴. مشکلات تجمیع خودروهای برقی و راهکارها ..... ۶۲
**فصل پنجم- مشارکت V2G در بازار ذخیره چرخان به منظور کنترل فرکانس شبکه** ..... ۶۴
۵-۱. تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت ..... ۶۶
۵-۱-۱. بازار انرژی ..... ۶۷
۵-۱-۲. بازار ذخیره چرخان ..... ۶۸
۵-۲. مشارکت V2G در بازار ذخیره چرخان به منظور کنترل فرکانس ..... ۷۵
۵-۳. نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی ..... ۷۶
۵-۴. خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده ..... ۸۰
۵-۵. محیط رقابتی ..... ۸۳
۵-۶. الگوریتم پیشنهادی ..... ۸۶
۵-۷. شبیه‌سازی و بیان نتایج ..... ۸۹
۵-۸. تاثیر تامین ذخیره چرخان با V2G در کنترل فرکانس شبکه ..... ۹۵
**فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات** ..... ۱۰۰

۶-۱. نتیجه‌گیری ..... ۱۰۱
۶-۲. پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار ..... ۱۰۲
**فصل هفتم- مراجع** ..... ۱۰۴

# فهرست جداول و شکل‌ها

شکل۲-۱: آمار تعداد مورد انتظار فروش خودروهای جهانی توسط آژانس انرژی بین المللی ..... ۷

شکل۲-۲: رقابت میان EV و PHEV برای تصاحب بازار ..... ۸

شکل۲-۳ : رشد تقاضای کشورها برای شارژ EVها ..... ۸

شکل۲-۴: یک نمونه خودروی برقی در حال شارژ ..... ۹

شکل۲-۵: نحوه شارژ انواع خودروهای برقی ..... ۱۱

شکل۲-۶: کنترل‌کننده شارژ نصب شده بر روی خودروی برقی ..... ۱۵

شکل۲-۷: شماتیک اتصال خودرو به شبکه ..... ۱۵

شکل۲-۸: نمونه‌ای از تغییرات SOC در یک روز کامل ..... ۱۷

شکل۲-۹: نمونه‌ای از تغییرات SOC در یک روز کامل ..... ۱۷

شکل۲-۱۰: دسترس‌پذیری خودروهای یک شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز ..... ۱۸

شکل۲-۱۱: تاثیر V2Gها بر منحنی بار یک روز تابستانی در کالیفرنیا ..... ۲۱

شکل۲-۱۲ : تاثیر هموار کردن منحنی بار توسط خودروی برقی در وضعیت شارژ باتری خودرو..... ۲۲

شکل۲-۱۳: پاسخ V2G به سیگنال تنظیم توان ..... ۲۲

شکل۲-۱۴: پاسخ یک نیروگاه بخار ۲۵۰ مگاواتی به سیگنال تنظیم توان..... ۲۳

شکل۳-۱: یک نمونه انحراف فرکانس بعد از دست دادن ۱۳۲۰ مگاوات تولید ..... ۲۷

شکل۳-۲: بلوک دیاگرام مدل توربین ژنراتور ..... ۲۷

شکل۳-۳: مدل ساده شده حلقه کنترل بار فرکانس..... ۲۸

شکل۳-۴: مشخصه ایده‌آل حالت ماندگار گاورنر با شیب افتی سرعت ..... ۲۸

شکل۳-۵: نمایش بلوکی سیستم AGC برای یک سیستم با دو ناحیه ..... ۲۹

شکل ۴-۱: شماتیک کلی سیستم تحت مطالعه ..... ۳۸

شکل۴-۲: مدل الکتریکی ماشین ..... ۴۰

شکل۴-۳: شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون ..... ۴۱
شکل۴-۴: بلوک دیاگرام کنترلر سیستم تحریک ..... ۴۱
شکل۴-۵: مدل در نظر گرفته شده برای سیستم تحریک ..... ۴۱
شکل۴-۶: بلوک دیاگرام گاورنر ..... ۴۲
شکل۴-۷: مدل در نظر گرفته شده برای توربین ..... ۴۲
شکل۴-۸: مدل خط انتقال ..... ۴۳
شکل۴-۹: مدل بار الکتریکی ..... ۴۳
شکل۴-۱۰: مدل ساده شده V2G ..... ۴۴
شکل۴-۱۱: مدل ساده شده باتری ..... ۴۴
شکل۴-۱۲: شماتیک اتصال خودروی برقی به شبکه ..... ۴۴
شکل۴-۱۳: شماتیک کلی اینورتر ..... ۴۵
شکل۴-۱۴: بلوک دیاگرام تولید موج دندانه اره‌ای ..... ۴۵
شکل۴-۱۵: موج‌های دندانه اره‌ای ..... ۴۶
شکل۴-۱۶: موج دندانه‌اره‌ای و مراجع ولتاژ ..... ۴۷
شکل۴-۱۷: پالس تولید شده برای سوئیچ ۱ ..... ۴۷
شکل۴-۱۸: مدار قدرت اینورتر ..... ۴۸
شکل۴-۱۹: ولتاژ فاز a (Van) ..... ۴۸
شکل۴-۲۰: هارمونیک اول ولتاژ Van ..... ۴۹
شکل۴-۲۱: مدار کنترلی اینورتر ..... ۴۹
شکل۴-۲۲: تغییرات جریان ترمینال ژنراتور در اثر پدیده کیفیت توان در حضور V2Gها ..... ۵۱
شکل۴-۲۳: تغییرات جریان ترمینال ژنراتور در اثر پدیده کیفیت توان در حضور V2Gها ..... ۵۱
شکل۴-۲۴: نوسانات فرکانس شبکه هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس ..... ۵۳

شکل۴-۲۵: نوسانات فرکانس شبکه هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس ..... ۵۳

شکل۴-۲۶: مقایسه نوسانات فرکانس شبکه هنگام افزایش بار در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکتV2G..... ۵۴

شکل۴-۲۷: توان ورودی بهV2G هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس ..... ۵۵

شکل۴-۲۸: توان ورودی به V2G هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس..... ۵۵

شکل۴-۲۹: تاثیر مشارکت V2G در توان ورودی به V2Gهنگام اتصال ناگهانی بار ..... ۵۶

شکل۴-۳۰: تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس .....۵۷

شکل۴-۳۱: تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس .....۵۷

شکل۴-۳۲: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار .....۵۷

شکل ۴-۳۳: نوسانات فرکانس شبکه هنگام قطع ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس .....۵۸

شکل ۴-۳۴: نوسانات فرکانس شبکه هنگام قطع ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس .....۵۹

شکل۴-۳۵: مقایسه نوسانات فرکانس شبکه هنگام افزایش بار در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2G ..... ۵۹

شکل۴-۳۶: تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس .....۶۰

شکل۴-۳۷: تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس ..... ۶۰

شکل۴-۳۸: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار ..... ۶۱

شکل۴-۳۹: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان ورودی به V2G هنگام قطع ناگهانی بار .....۶۱

شکل۵-۱: قیمت تسویه بازار انرژی اروپا ..... ۶۸

شکل۵-۲: استفاده از سرویس‌های رزرو برای بازگرداندن پایداری سیستم قدرت ..... ۷۰

جدول۵-۱: تعریف برخی خدمات جانبی مهم ..... ۷۱

شکل۵-۳: ارتباطات فنی و اقتصادی نهادگردهم آورنده با بهره بردار مستقل شبکه و خودروهای برقی متصل به شبکه .....۷۷

شکل۵-۴: شماتیک مدل‌های تجاری مختلف نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی .....۷۹

شکل۵-۵: احتمال گرایش یک خودرو به نهاد گردهم‌آورنده اول ..... ۸۴

شکل ۵-۶: مراحل رسیدن به نتایج مسئله ..... ۸۵

شکل۵-۷: سناریوی قیمت بازار ذخیره چرخان ..... ۸۷

شکل۵-۸: سناریوی احتمال فراخوانی شدن نهاد گردهم‌آورنده ..... ۸۷

شکل۵-۹: سناریوی قیمت بازار انرژی ..... ۸۸

شکل۵-۱۰: الگوریتم ژنتیک ..... ۹۱

جدول۵-۲: پارامترهای ثابت مساله بهینه‌سازی .....۹۲

شکل۵-۱۱: تقاضای نهاد گردهم‌آورنده اول در بازار انرژی ..... ۹۳

شکل۵-۱۲: پیشنهاد نهاد گردهم‌آورنده اول به بازار ذخیره چرخان ..... ۹۳

شکل۵-۱۳: سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت شارژ ..... ۹۴

شکل۵-۱۴: تغییرات سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت‌های شارژ ..... ۹۴

شکل۵-۱۵: تغییرات سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت‌های شارژ بصورت واضح‌تر..... ۹۵

شکل۵-۱۶: شماتیک کلی سیستم سه باسه تحت مطالعه ..... ۹۶

شکل۵-۱۷: نوسان فرکانس سیستم سه باسه در اثر اتصال یک بار ..... ۹۷

شکل۵-۱۸: نوسانات فرکانس سیستم در حضور V2G با هدف تامین رزرو جرخان ..... ۹۸

شکل۵-۱۹: تاثیر عملکرد V2G در کنترل فرکانس شبکه با هدف تامین رزرو چرخان ..... ۹۸

# فصل اول

# مقدمه

افزایش بی‌رویه منابع انرژی تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا، تولید زیاد $CO_2$، پدیده گرم شدن زمین و افزایش گازهای گلخانه‌ای را به همراه داشته است. بخش قابل توجهی از سوخت‌های فسیلی در مصارف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما خودروهای احتراق داخلی به عنوان بزرگترین مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی و موثرترین عامل در ازدیاد آلودگی جوی شناخته شده‌اند. از سوی دیگر این خودروها علاوه بر معضل آلودگی هوا، اثرات زیست‌محیطی دیگری مانند آلودگی صوتی را نیز به دنبال دارند. امروزه این موضوع به یکی از مسائل بحث‌برانگیز جوامع مدرن امروزی تبدیل شده و اقدامات ویژه‌ای جهت حفظ محیط زیست در دستور کار قرار گرفته است.

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و روند رو به اتمام آنها از عوامل دیگری بود که متخصصین را به طرح ایده‌های نو به منظور محدود کردن استفاده از اینگونه سوخت‌ها واداشته است. یکی از مهم‌ترین راهکارها در جهت حل این معضلات، استفاده از خودروهای برقی می‌باشد. مطالعات گسترده‌ای پیرامون اثرات زیست‌محیطی این خودروها انجام شده و مزایای آن در کاهش آلودگی‌های جوی به اثبات رسیده است [۱]. به طور کلی خودروهای برقی شامل انواع مختلفی از قبیل خودروهای باتری‌دار (BEV[1])، خودروهای پیل سوختی (FCV[2]) و خودروهای الکتریکی هیبریدی (HEV[3]) می‌باشند. در تمامی این خودروها از یک باتری به منظور ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. خودروهای برقی برای رانندگی می‌توانند انرژی مورد نیاز خود را از انرژی ذخیره شده در باتری تامین نمایند.

از سوی دیگر پیشرفت‌های اخیر در شبکه‌های قدرت و چشم‌انداز آینده این سیستم‌ها در جهت حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند[4]، قابلیت‌های ویژه‌ای را برای خودروهای برقی فراهم آورده است.

[1] Battery Electric Vehicle
[2] Fuel Cell Electric Vehicle
[3] Hybrid Electric Vehicle
[4] Smart Grids

با توجه به ارتباطات پیشرفته شبکه‌های هوشمند و ویژگی‌های خودروهای برقی، قابلیت مشارکت این خودروها در جهت پشتیبانی از شبکه نیز امکان‌پذیر است. در واقع می‌توان بواسطه قابلیت تبادل دوطرفه توان خودروهای برقی با شبکه، در مواقع لزوم از انرژی ذخیره شده در باتری این خودروها برای تزریق توان به شبکه قدرت استفاده کرد.

در یک شبکه هوشمند با ایجاد پارکینگ‌های ویژه‌ای در اماکن عمومی یا منازل، به خودروها امکان اتصال هوشمند به شبکه قدرت و تبادل انرژی داده می‌شود. این پارکینگ‌ها به منظور تبادل اطلاعاتی از قبیل وضعیت شارژ باتری، خواسته‌های صاحبان خودروها برای رانندگی طرح و پیاده‌سازی شدند. لذا ارتباطات رادیویی و بی‌سیم در جهت تبادل اطلاعات از اتاق فرمان اپراتور شبکه به خودروها الزامی می‌باشد. نکته قابل توجه آنکه اتصال خودروهای برقی به این پارکینگ‌ها در شبکه‌های قدرت سنتی میسر نمی‌باشد. به عبارت دیگر بهره‌مندی از خودروهای برقی با توجه به تکنولوژی ساخت و نحوه ارتباط آنها با شبکه، نیازمند به روز شدن و دگرگونی زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی در شبکه‌های قدرت می‌باشد. این مساله، متخصصین شبکه‌های قدرت را در جهت حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند مصمم‌تر نموده است. پیش‌بینی می‌شود با بهره‌گیری از قابلیت‌های ویژه خودروهای برقی در این شبکه‌ها، امکان تصحیح منحنی بار، کنترل فرکانس، تامین ذخیره چرخان و ... نیز توسط خودروهای برقی فراهم شود.

کنترل فرکانس شبکه یکی از اصلی‌ترین موضوعات مطرح در شبکه‌های قدرت برای حفظ پایداری و قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. خودروهای برقی دارای قابلیت‌های ویژه‌ای برای بهبود کنترل فرکانس شبکه می‌باشند که در این پایان‌نامه به بررسی این موضوع و مسائل مرتبط با آن پرداخته شده است. ساختار کلی پایان‌نامه به شرح زیر می‌باشد:

در فصل دوم ابتدا دلایل تولید و گسترش خودروهای برقی بیان شده و سپس ساختار انواع خودروهای برقی و همچنین مزایا و معایب این خودروها نسبت به خودروهای درونسوز بررسی شده است. سپس

قابلیت‌های خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه در پشتیبانی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. فصل سوم به پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه در کنترل فرکانس شبکه اختصاص دارد. در فصل چهارم به مطالعه قابلیت خودروهای برقی برای کنترل فرکانس در یک شبکه هوشمند پرداخته شده و از شبیه‌سازی و مطالعه موردی برای تایید نتایج استفاده شده است. در فصل پنجم به معرفی انواع خدمات جانبی[1] و مخصوصا سرویس ذخیره چرخان پرداخته شده و هزینه‌های پرداختی در بازار ذخیره بررسی شده است. سپس به معرفی نهاد گردهم‌آورنده به عنوان بازیگر نوظهور بازار برق پرداخته و هزینه و درآمدهای نهاد گردهم‌آورنده بیان شده است. پس از آن با در نظر گرفتن نکات فنی و اقتصادی اتصال خودروهای برقی به شبکه تحت کنترل نهاد گردهم‌آورنده و همچنین پارامترهای غیر قطعی مربوط به مساله خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده، قابلیت نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی برای شرکت در بازار ذخیره چرخان تشریح شده است. پس از معرفی محیط رقابتی بازار برای مشارکت چندین نهاد گردهم‌آورنده، فرمول‌بندی ریاضی سود خالص نهاد گردهم‌آورنده بیان شده و سپس الگوریتم جدیدی برای برنامه‌ریزی بهینه نهاد گردهم‌آورنده در یک محیط رقابتی ارائه شد. نهایتا فصل ششم به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار اختصاص دارد.

[1] Ancillary Services

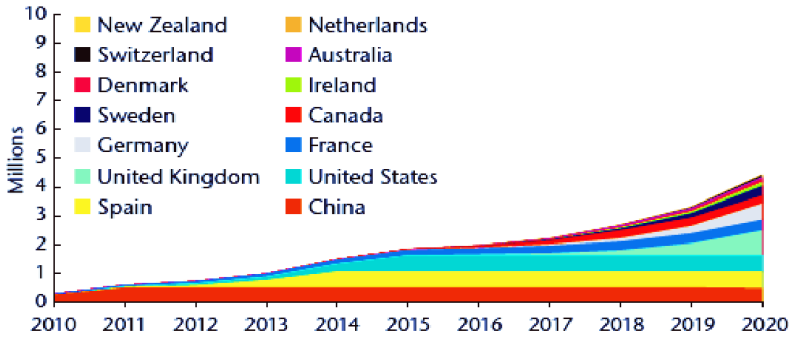
## فصل دوم

# معرفی ساختار و عملکرد خودروهای برقی

استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی و خودروهای درونسوز، تاثیرات نامطلوب زیست‌محیطی و افزایش گازهای گلخانه‌ای را در جوامع مدرن امروزی در پی داشته است. افزایش قیمت حامل‌های انرژی، نگرانی‌های ناشی از اتمام سوخت‌های فسیلی و تولید زیاد $CO_2$، کارخانه‌های سازنده خودرو را بر آن داشت تا با تغییر تکنولوژی ساخت خودروها به حفظ محیط زیست کمک کنند. در واقع سازندگان خودرو درصدد جایگزینی انرژی پاک به جای سوخت‌های فسیلی برآمدند. از سوی دیگر پایین بودن بازده خودروهای درونسوز باعث شد تا تکنولوژی‌های سازگار با محیط زیست مانند خودروهای برقی بیشتر مورد توجه قرار گیرند. امروزه تکنولوژی خودروهای برقی با کاربردهای مختلف در حال توسعه می‌باشد. چشم‌انداز آینده این تکنولوژی، گسترش روزافزون استفاده از خودروهای برقی را نشان می‌دهد. در این فصل به معرفی کلی ساختار این خودروها و جایگاه این تکنولوژی پرداخته شده است.

## ۲-۱. چشم‌انداز تکنولوژی خودروهای برقی

مزایای عمده خودروهای برقی (EV[1]) و سازگاری آن با تکنولوژی دنیای مدرن آینده منجر به گسترش روزافزون تقاضای این تکنولوژی در سراسر دنیا شده است. مطالعات نشان می‌دهند تقاضا برای خودروهای الکتریکی هیبریدی (HEV) و خودروهای الکتریکی باتری‌دار (BEV) تا سال ۲۰۱۰ به ۱۰۰۰۰۰ دستگاه رسیده است و پیش‌بینی می‌شود این تعداد تا سال ۲۰۲۰ به ۴۰۰۰۰۰۰ دستگاه افزایش یابد [۲, ۳]. درشکل زیر نیز نمونه‌ای از پیش‌بینی تقاضا برای خودروهای برقی در کشورهای مختلف نشان داده شده است.

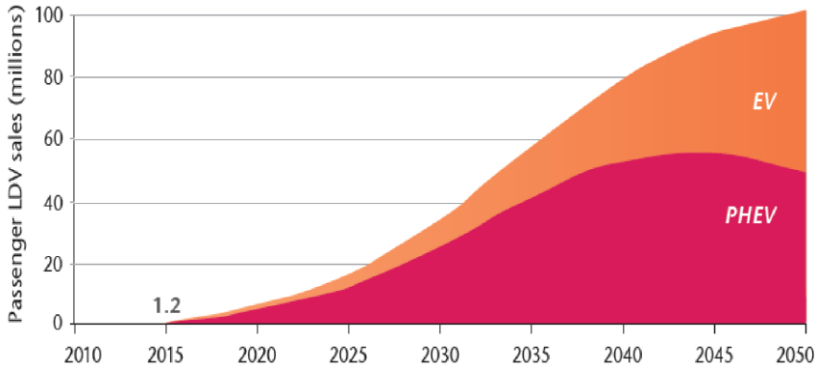



شکل۲-۱: آمارتعداد مورد انتظار فروش خودروهای جهانی توسط آژانس انرژی بین المللی [۴]

انرژی الکتریکی مورد نیاز EVها توسط باتری تامین می‌شود. چنانچه این خودروها با اتصال به شبکه قدرت انرژی مورد نیاز باتری خود را از شبکه دریافت نمایند، با عنوان خودروهای هیبریدی قابل اتصال به شبکه (PHEV[2]ها) شناخته می‌شوند. در خودروهای هیبریدی به منظور رانندگی از ترکیب بانک باتری و موتور احتراق داخلی (درونسوز) استفاده می‌شود. بدیهی‌ست باتری‌ها برای پیمودن مسافت‌های کوتاه و درون‌شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور رانندگی مسافت‌های طولانی‌تر در صورت تمام شدن شارژ باتری‌ها، از موتور درونسوز استفاده می‌شود.

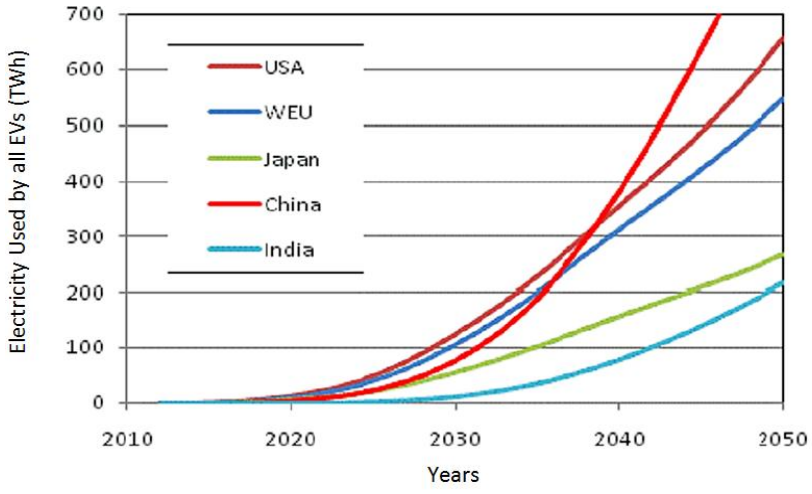
[1] Electric Vehicle
[2] Plug In Hybrid Electric Vehicle

رشد تقاضا برای فروش این خودروها با روند رو به چشمگیری همراه بوده است. در شکل زیر رقابت بین EV و PHEV برای تصاحب بازار در آینده نه چندان دور سال‌های ۵۰-۲۰۲۰ این مطلب را تایید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود در سال‌های ۲۰۵۰ و پس از آن، تقاضای فروش EVها بیشتر خواهد شد و انتظار می‌رود در رقابت با خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه پیروز خواهد بود.




شکل۲-۲: رقابت میان EV و PHEVها برای تصاحب بازار [۴]

افزایش خودروهای برقی، آینده صنعت برق و شبکه قدرت را با تحول بزرگی مواجه خواهد ساخت. همزمان با افزایش تعداد این خودروها، تقاضای انرژی برای شارژ آنها افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در آینده بخش قابل توجهی از بار شبکه‌های قدرت را انرژی مورد نیاز برای شارژ EVها تشکیل خواهد داد. در شکل زیر نمونه‌ای از پیش‌بینی انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروها در بعضی کشورهای صنعتی نشان داده شده است.




شکل۲-۳ : رشد تقاضای کشورها برای شارژ EVها [۵]

رشد چشمگیر تقاضا برای خودروهای برقی بسیاری از سازندگان را به تولید این خودروها تشویق نموده است. تویوتا پریوس[1] یکی از بزرگترین تولیدکنندگان خودروهای برقی به شمار می‌رود. در حقیقت موفقیت بزرگ این تولیدکننده برای اولین بار در جهت تولید خودروهای برقی باعث تشویق دیگر سازندگان خودروهای برقی شد. این شرکت تاکنون تعداد زیادی از محصولات خود را با کاربردهای مختلف تجاری، صنعتی، عمومی و شخصی به فروش رسانده است [۶]. شکل زیر یک نمونه خودروی برقی را در حال شارژ شدن نشان می‌دهد.

شکل۲-۴: یک نمونه خودروی برقی در حال شارژ [۷]

## ۲-۲. انواع خودروهای برقی

خودروهای متعارف از نوع درونسوز (ICEV[2]) برای ادامه حرکت خود از سوخت‌های فسیلی توسط موتور احتراق داخلی استفاده می‌کنند. آلودگی ناشی از این خودروها نسبتا زیاد بوده و راندمان آنها در سرعت‌های مختلف متغیر و نسبتا کم است [۸]. در مقابل خودروهای برقی علاوه بر دارا بودن راندمان بالاتر، آلودگی بسیار کمتری تولید کرده و سازگاری مناسبی با محیط زیست دارند. به طور کلی خودروهای برقی در چند دسته کلی خودروهای باتری‌دار (BEV)، خودروهای پیل سوختی (FCV) و خودروهای هیبرید برقی (PHEV,HEV) تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار این خودروها تا حدودی با یکدیگر متفاوت است.

[1] Toyota Pirus
[2] Internal Combustion EngineVehicles

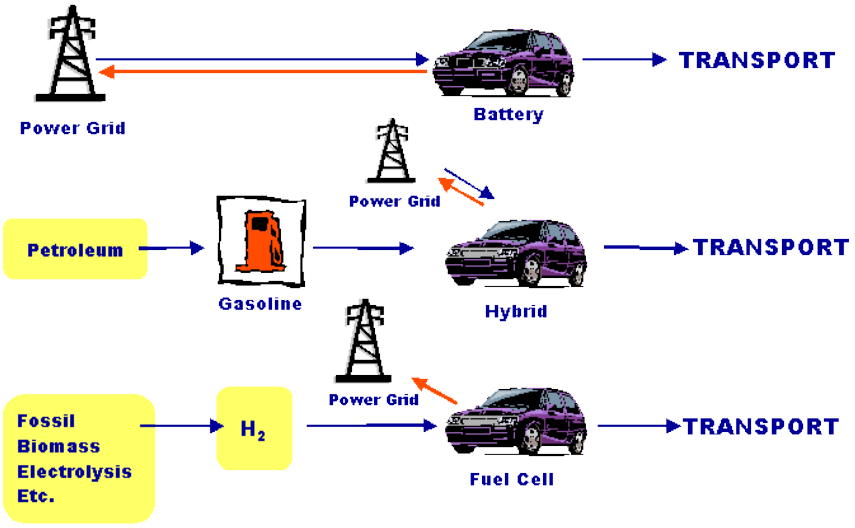
خودروهای باتری‌دار انرژی را به صورت شیمیایی در باتری خود ذخیره می‌کنند. ارزان‌ترین نوع باتری، باتری سربی اسیدی[1] می‌باشد. باتری‌های نیکل فلز[2]، لیتیوم-یون[3] و پلیمر متال- لیتیوم[4] به دلیل طول عمر بیشتر، اندازه کوچکتر و وزن کمتر، مورد توجه می‌باشند. در حال حاضر باتری لیتیوم-یون متداول‌ترین نوع باتری مورد استفاده در خودروهای برقی می‌باشد.

در خودروهای پیل سوختی از ترکیب پیل سوختی و باتری برای تغذیه موتور الکتریکی خودرو استفاده می‌شود. در این نوع ساختار معمولا با ترکیب دو عنصر هیدروژن و اکسیژن، گرما، آب و برق تولید می‌شود. بر عکس با عمل الکترولیز، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کنند و این چرخه ادامه پیدا می‌کند. با توجه به این نحوه عملکرد پیل سوختی، آلودگی ناشی از این نوع خودروها تقریبا ناچیز است [۹]. خودروهای پیل سوختی محدودیت‌های مربوط به طی مسافت‌های کوتاه یا مدت زمان شارژ طولانی را ندارند اما تکنولوژی ساخت و توجیه اقتصادی این نوع خودروها در حال حاضر کمتر از حداقل‌های لازم برای تولید انبوه و کاربرد عمومی آنها می‌باشد [۱۰].

خودروهای هیبریدی علاوه بر باتری و موتور الکتریکی، دارای موتور احتراق داخلی نیز می‌باشند. سیستم الکتریکی و موتور درونسوز می‌توانند با ساختارهای سری یا موازی، نیروی لازم برای حرکت خودرو را فراهم کنند. در بعضی از ساختارهای خودروهای هیبریدی جهت شارژ باتری و ادامه حرکت، از دو نوع منبع تغذیه شامل باتری الکتریکی و منبع سوخت فسیلی استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند علی‌رغم استفاده از منابع سوخت‌های فسیلی، میزان آلودگی این نوع خودروها در مقایسه با خودروهای متعارف کمتر است [۱۱]. باتری مورد استفاده در خودروهای هیبریدی متصل به شبکه (PHEV) می‌تواند با دریافت انرژی از شبکه شارژ شود [۱۲]. خودروهای هیبریدی علاوه بر بهره‌مندی از مزایای خودروهای باتری‌دار و پیل سوختی، از قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به این خودروها

[1] Lead Acid
[2] Nickel-metal Hydride
[3] Lithium Ion
[4] Metal- Lithium Polymer

برخوردار می‌باشند [۸]. در شکل زیر نحوه سوخت‌رسانی و شارژ خودروهای هیبریدی با سایر خودروهای الکتریکی به صورت شماتیک مقایسه شده است.




شکل۲-۵: نحوه شارژ انواع خودروهای برقی [۷]

## ۲-۳. مزایا و معایب خودروهای برقی

از مزایای خودروهای برقی نسبت به خودروهای درونسوز به عوامل متعددی می‌توان اشاره نمود. انرژی مصرفی خودروهای درونسوز سوخت‌های فسیلی می‌باشد در حالیکه خودروهای برقی با مصرف برق، انرژی مورد نیاز خود را تامین می‌کنند. در صورتیکه انرژی الکتریکی بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی تولید شود، بکارگیری خودروهای برقی در سیستم حمل و نقل باعث عدم تولید CO2، کمتر شدن آلودگی هوا و کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

چنانچه انرژی الکتریکی توسط سوخت‌های فسیلی تولید شود، باز هم استفاده از خودروهای برقی باعث افزایش راندمان کلی سیستم خواهد شد. در این وضعیت به جای اینکه مقدار زیادی از سوخت‌های فسیلی به صورت پراکنده در موتور خودروهای درونسوز با بازده نسبتا پایین مصرف شوند، در نیروگاه‌ها به صورت یکجا و با بازده بالاتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتور الکتریکی خودروهای برقی دارای بازده نسبتا بالایی بوده و تولید انرژی الکتریکی در مقیاس زیاد نیز با بازده بالاتری صورت می‌گیرد. بدین ترتیب راندمان کل سیستم افزایش می‌یابد [۱۳].

از بارزترین ویژگی‌های خودروهای برقی امکان بکارگیری سیستم‌های تولید مجدد[1] در موتورهای محرک این خودروها می‌باشد. این سیستم در هنگام حرکت انرژی ذخیره شده در باتری خودرو را دریافت نموده و به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. در خودروهای برقی این امکان وجود دارد که به هنگام ترمزگیری، موتور الکتریکی خودرو وارد حالت ژنراتوری شده و با دریافت انرژی جنبشی خودرو و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، به شارژ باتری خودرو کمک کند. در خودروهای درونسوز چنین امکانی وجود ندارد و انرژی جنبشی خودرو در هنگام ترمزگیری به صورت گرما در لنت ترمز هدر می‌رود. بدیهی است بکارگیری سیستم تولید مجدد باعث افزایش قابل توجهی در راندمان خودرو می‌شود.

از دیگر موضوعات قابل توجه در مورد خودروهای برقی، عدم مصرف انرژی این خودروها در هنگام توقف است. خودروهای درونسوز به طور متوسط زمان قابل توجهی را در پشت چراغ قرمز یا در حالت توقف می‌باشند. در این زمان موتور خودرو روشن بوده و سوخت مصرف می‌کند در حالیکه خودروهای برقی در هنگام توقف مصرف سوخت ندارند. این موضوع باعث افزایش راندمان متوسط خودرو می‌شود.

یکی دیگر از مزایای خودروهای برقی، آلودگی صوتی بسیار کمتر نسبت به خودروهای درونسوز می‌باشد. به طور کلی موتورهای الکتریکی نسبت به موتورهای احتراقی، نویز صوتی بسیار کمتری تولید می‌کنند. این در حالیست که امروزه با افزایش روزافزون تعداد خودروها، آلودگی صوتی ناشی از تردد این خودروها به یک مشکل جدی تبدیل شده است.

علاوه بر موارد فوق، خودروهای برقی در افزایش کارایی نیروگاه‌های بادی نیز نقش موثری دارند. معمولا نیروگاه‌های بادی به واسطه افزایش وزش باد در نیمه شب، توان بیشتری تولید می‌کنند که به دلیل کاهش بار شبکه در ساعات نیمه شب ممکن است توان تولیدی نیروگاه‌های بادی لزوما مورد

[1] Regenerative

مصرف واقع نشود [۱۴]. اما خودروهای برقی می‌توانند با دریافت انرژی تولیدی نیروگاه‌های بادی در نیمه شب، باتری خود را شارژ نمایند. این انرژی در روز برای رانندگی مورد استفاده قرار گرفته و هدر نمی‌رود.

از معایب خودروهای برقی، می‌توان به طولانی بودن مدت زمان شارژ، عدم توانایی باتری برای طی کردن مسافت‌های طولانی، حجیم بودن باتری و نیز طول عمر کم باتری آنها اشاره کرد. خودروهای متعارف قابلیت ذخیره سریع انرژی و طی کردن مسافت طولانی را دارند در حالیکه خودروهای برقی به مدت زمان طولانی برای شارژ شدن نیاز دارند و مسافت کمتری را می‌توانند طی کنند [۱۰]. این مشکل، سازندگان خودروهای برقی را به سمت طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع ترغیب نموده است. در این ایستگاه‌ها از ترکیب سوپرخازن و فلایویل به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی استفاده می‌شود. انرژی ذخیره شده در این سیستم‌ها می‌تواند توسط مدارهای واسطه خاصی در زمان نسبتا کم به باتری خودرو انتقال یابد [۱۵].

## ۲-۴. خودروهای برقی متصل به شبکه (V2G[1])

بسیاری از خودروهای برقی، برای شارژ باتری خود نیازمند اتصال به شبکه قدرت می‌باشند. این خودروها با استفاده از یک مدار واسطه، ولتاژ متناوب شبکه را به ولتاژ مناسب برای شارژ باتری تبدیل می‌کنند. مدار واسطه شارژ باتری از عناصر نیمه‌هادی قدرت ساخته شده و معمولا از قابلیت انتقال توان به صورت دوطرفه نیز برخوردار است. بنابراین این خودروها می‌توانند در مواقع لزوم، انرژی ذخیره شده در باتری خود را به شبکه تحویل دهند. خودروهای برقی متصل به شبکه با قابلیت انتقال توان دوطرفه، باعنوان V2Gشناخته می‌شوند [۱۶]. در بعضی مراجع، خودروهای برقی در هنگام انتقال

[1] Vehicle to Grid

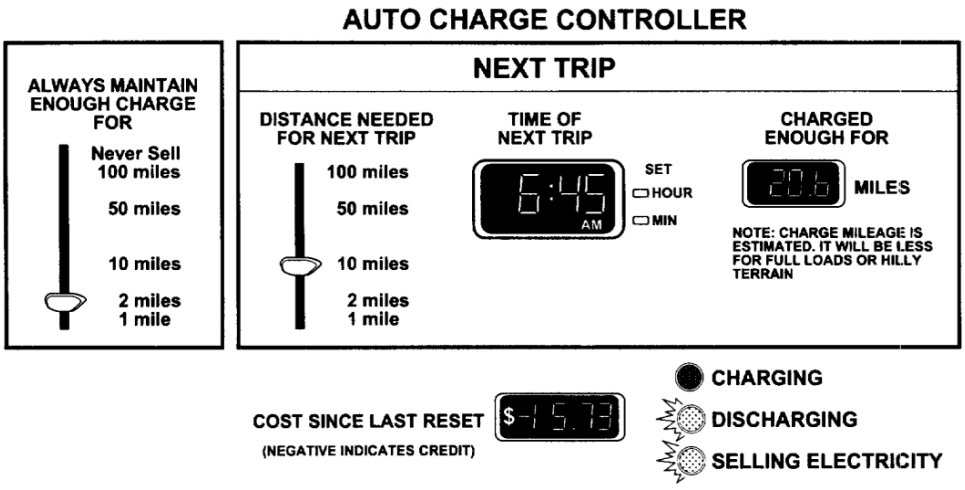
توان از خودرو به شبکه، با عنوان V2G و در صورت انتقال توان از شبکه به خودرو، با عنوان G2V[1] شناخته می‌شود [۱۷].

به منظور استفاده بهینه از قابلیت‌های گسترده V2Gها، حداقل دو نوع اتصال مختلف به شبکه مورد نیاز می‌باشد:

۱) اتصال قدرت که برای انتقال انرژی از شبکه به خودرو و یا برعکس می‌باشد.
۲) اتصال کنترلی و مخابراتی که امکان کنترل مبادله توان خودرو با شبکه را توسط کنترل‌کننده مرکزی فراهم می‌کند. این اتصال برای اطلاع کنترل‌کننده مرکزی از وضعیت شارژ باتری هر یک از خودروها، حداقل شارژ لازم هر خودرو و نیز زمان‌های اتصال و انفصال تعیین شده توسط مالک خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

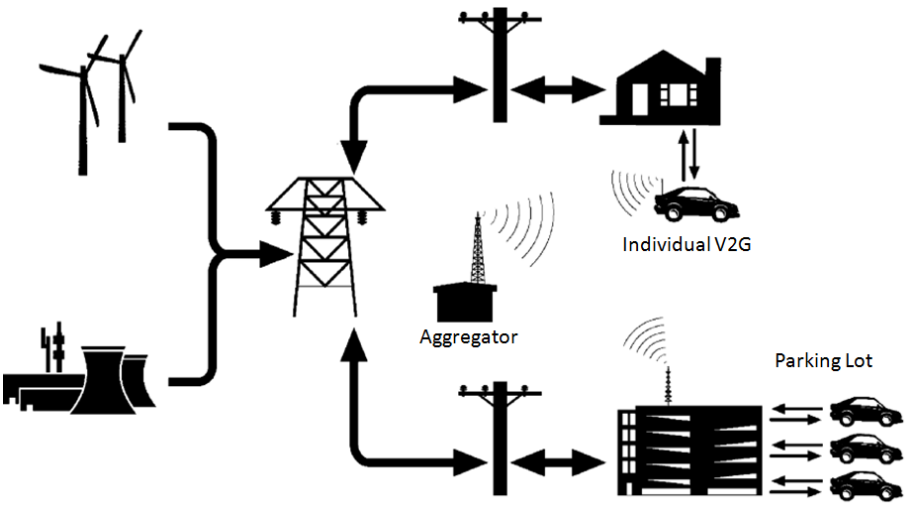
اتصال مخابراتی خودروها به شبکه می‌تواند به صورت بی‌سیم و یا از طریق پروتکل‌های ویژه‌ای در شبکه تلفن ثابت انجام شود. در واقع هر خودرو دارای یک IP[2] ثبت شده در کنترل‌کننده مرکزی می‌باشد. مشخصات هر خودرو توسط IP آن شناسایی می‌شود. علاوه بر این هر خودرو برقی مجهز به یک کنترل‌کننده شارژ می‌باشد که بر روی خود خودرو نصب می‌شود. در شکل زیر نمونه‌ای از این کنترل‌کننده نشان داده شده است.

[1] Grid to Vehicle
[2] Internet Protocol




شکل۲-۶: کنترل‌کننده شارژ نصب شده بر روی خودروی برقی [۱۸]

مالک خودرو می‌تواند اطلاعاتی از قبیل حداقل شارژ لازم برای خودرو، زمان بعدی انفصال از شبکه، حداقل مسافت رانندگی تا اتصال بعدی و ... را در هر بار اتصال به شبکه از طریق کنترل‌کننده شارژ مذکور به شبکه انتقال دهد. اطلاعات دیگری از قبیل میزان شارژ باتری، میزان سوخت هیدروژن موجود در خودروهای پیل سوختی و ... نیز توسط خود کنترل‌کننده، اندازه‌گیری شده و به شبکه انتقال می‌یابد. در شکل زیر مفهوم V2G و نیز چگونگی اتصال قدرت و اتصال مخابراتی آن به شبکه به صورت بی‌سیم نشان داده شده است.




شکل۲-۷: شماتیک اتصال خودرو به شبکه [۱۹]

## ۲-۵. مشخصات باتری‌ها

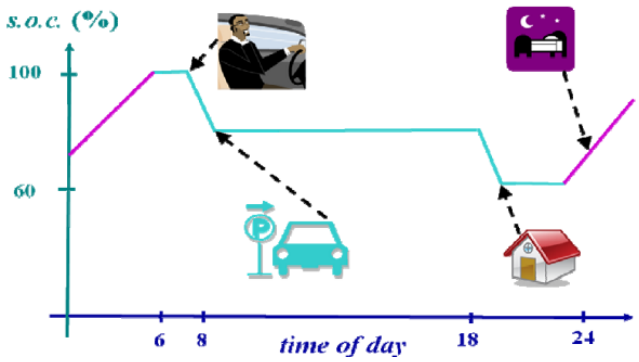
باتری خودروهای برقی یکی از مهم‌ترین اجزای خودرو می‌باشد که مشخصات آن بر قابلیت‌های عملکرد خودرو و نیز برنامه‌ریزی شارژ خودرو توسط شبکه تاثیر زیادی دارد. یکی از مشخصه‌های مهم باتری، ظرفیت باتری است. ظرفیت باتری خودروهای برقی به صورت حداکثر انرژی قابل ذخیره‌سازی در باتری بر حسب کیلووات ساعت تعریف می‌شود. بسیاری از قابلیت‌های خودروهای برقی متاثر از ظرفیت باتری آن می‌باشد. معمولا باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی دارای ظرفیت ۱ تا ۳۰ کیلووات ساعت می‌باشند. با فرض اینکه شارژ یا دشارژ کامل باتری در حدود ۵ ساعت طول بکشد، توان موتور الکتریکی خودرو بین ۰/۲ تا ۶ کیلووات متغیر خواهد بود [۲۰].

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی تولید باتری‌های با حجم کمتر و ظرفیت بیشتر، امکان افزایش بیشتر در توان موتور خودروهای برقی را فراهم آورده است. این پیشرفت‌ها به طور خاص بر باتری‌های نوع لیتیوم-یون تمرکز یافته است. این نوع باتری‌ها به دلیل برتری‌های خاصی از قبیل عدم وابستگی راندمان باتری به درجه حرارت محیط، چگالی انرژی بیشتر و ... بیش از سایر انواع باتری‌ها در ساخت خودروهای برقی گسترش یافته و بیشتر مورد استقبال سازندگان خودروهای برقی قرار گرفته‌اند [۲۱]. به عنوان مثال شرکت تسلاموتورز[1] در سال ۲۰۰۹ یک نمونه خودروی الکتریکی باتری‌دار مدل رودستر[2] را با موفقیت آزمایش کرد. این خودرو با بهره‌گیری از یک باتری لیتیوم-یون با ظرفیت $۵۳^{kWh}$، قابلیت پیمودن مسافت $۳۵۰^{km}$ باهر شارژ باتری را دارا بوده و سرعت ماکزیمم آن برابر $۲۱۰^{km/h}$ می‌باشد [۲۲, ۲۳].

یکی دیگر از مشخصات باتری، وضعیت لحظه‌ای شارژ باتری (SOC[3]) در ساعات مختلف شبانه‌روز می‌باشد. این پارامتر در برنامه‌ریزی لحظه‌ای برای استفاده از باتری خودرو حائز اهمیت بوده و به

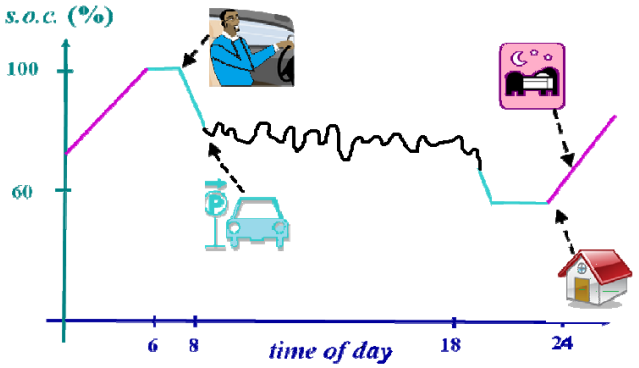
[1] www.teslamotor.com
[2] Tesla Roadster
[3] State Of Charge

صورت نسبت انرژی ذخیره شده در باتری به کل ظرفیت آن تعریف می‌شود. بدیهی است SOC در محدوده صفر تا یک تغییر می‌کند. هنگامی‌که SOC = 0 است، باتری کاملا دشارژ می‌باشد. با دریافت انرژی از شبکه، باتری شارژ شده و SOC تا مقدار ۱ افزایش می‌یابد. در این حالت باتری کاملا شارژ می‌باشد و مجددا با مصرف انرژی SOC رو به کاهش خواهد گذاشت. شکل زیر نمونه‌ای از تغییرات SOC یک خودرو را نشان می‌دهد. صاحب این خودرو باتری خودرو خود را شب هنگام در منزل شارژ می‌کند و صبح در پارکینگ محل کار، خودرو را بدون اتصال به شبکه در پارکینگ قرار می‌دهد. بنابراین SOC باتری در این بازه زمانی بدون تغییر باقی می‌ماند.




شکل۲-۸: نمونه‌ای از تغییرات SOC در یک روز کامل [۱۳, ۲۰]

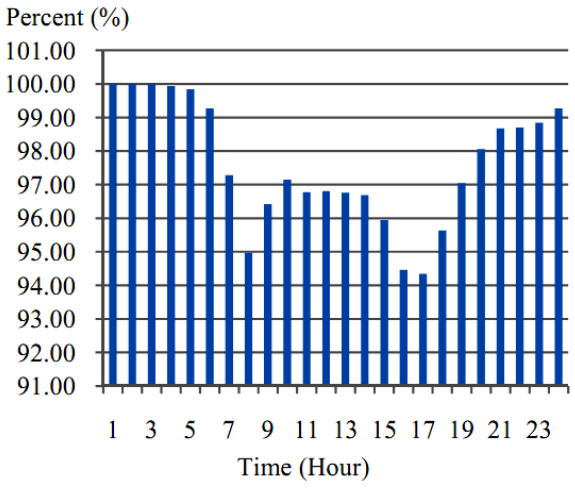
البته تغییرات SOC باتری همیشه به صورت هموار و یکنواخت نخواهد بود. وضعیت شارژ باتری با توجه به نحوه استفاده از آن در طول شبانه‌روز ممکن است دچار نوسانات زیادی شود. به گونه‌ای که وقتی خودروی برقی تبادل دو طرفه توان با شبکه برقرار می‌نماید، SOC باتری با توجه به قابلیت‌های باتری در هنگام شارژ یا دشارژ مطابق شکل ۲-۹ تغییر خواهد کرد [۶].




شکل۲-۹: نمونه‌ای از تغییرات SOC در یک روز کامل

## ۲–۶. قابلیت V2G در پشتیبانی شبکه[1] در موارد مختلف

مطالعات آماری نشان می‌دهد میزان استفاده از خودروهای شخصی در طول شبانه‌روز به چند ساعت محدود شده و این خودروها ساعات زیادی را در پارکینگ می‌گذرانند. بعضی آمارها میزان متوسط حضور خودروهای شخصی در پارکینگ را بین ۲۰ تا ۲۲ ساعت اعلام کرده‌اند [۲۴, ۲۵]. مطالعات دیگری در کشور دانمارک که توسط مرکز بین‌المللی آمار حمل و نقل دانمارک[2] انجام شده است، نشان می‌دهد بیش از ۹۴٪ خودروها در شبانه‌روز بلااستفاده می‌باشند. براساس این آمار هر خودرو به طور متوسط در یک شبانه‌روز حدود $۲۹/۴۸^{Km}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد که این مسافت در روزهای تعطیل و آخر هفته به $۴۰^{Km}$می‌رسد [۲۶]. نمونه‌ای از نتایج منتشر شده این مرکز برای درصد خودروهای در دسترس یک شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز، در شکل۲–۱۰ نشان داده شده است.




شکل۲–۱۰: دسترس‌پذیری خودروهای یک شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز [۲۶]

تحقیقات دیگری در کشور ایالات متحده آمریکا نشان می‌دهد یک خودروی شخصی در یک شبانه‌روز به طور متوسط در حدود ۲۲ مایل ($۳۵^{Km}$) می‌پیماید و مدت زمان استفاده از خودرو تقریبا ۵۲ دقیقه می‌باشد [۱۳]. بنابراین اگر یک خودروی برقی پس از انجام کارهای روزانه در پارکینگ قرار گیرد،

[1] Grid Support
[2] Danish National Transport Survey

دارای مقدار قابل توجهی شارژ باقیمانده در باتری خود می‌باشد. براساس پیش‌بینی‌های انجام شده در تحقیقات مذکور، باتری خودروهای برقی به طور متوسط در هنگام ورود به پارکینگ و اتصال به شبکه تقریبا دارای ۶۰٪ شارژ خواهد بود [۱۳]. این نتایج نگرانی‌های ناشی از عدم توانایی خودروهای برقی برای پیمودن مسافت‌های طولانی را تا حدودی برطرف می‌سازد. بنابراین به نظر می‌رسد برای خودروهای درون‌شهری، جایگزینی خودروهای متعارف با خودروهای برقی مشکلی ایجاد نکند. علاوه بر این مدت زمان نسبتا زیاد حضور خودروهای برقی در پارکینگ و میزان قابل توجه شارژ باتری آنها در هنگام ورود به پارکینگ می‌تواند به عنوان یک نکته مثبت برای پشتیبانی شبکه توسط خودروهای برقی تلقی شود.

همانگونه که قبلا نیز بیان شد انگیزه اصلی استفاده از V2Gها در سیستم حمل و نقل، کاهش آلودگی هوا، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر، افزایش راندمان خودرو و ... می‌باشد. از سوی دیگر خودروهای برقی مدت زمان قابل توجهی از شبانه روز را در پارکینگ می‌گذرانند و برای شارژ باتری خود در مدت حضور در پارکینگ به شبکه متصل می‌شوند. در شبکه‌های هوشمند توسعه یافته، با افزودن قابلیت ارتباط مخابراتی خودرو با شبکه، امکان کنترل هوشمند فرآیند شارژ باتری نیز فراهم می‌شود. علاوه بر این دسترسی به انرژی ذخیره شده در باتری خودروها، امکان انتقال توان از خودرو به شبکه در مواقع لزوم و پشتیبانی شبکه را ممکن می‌سازد.

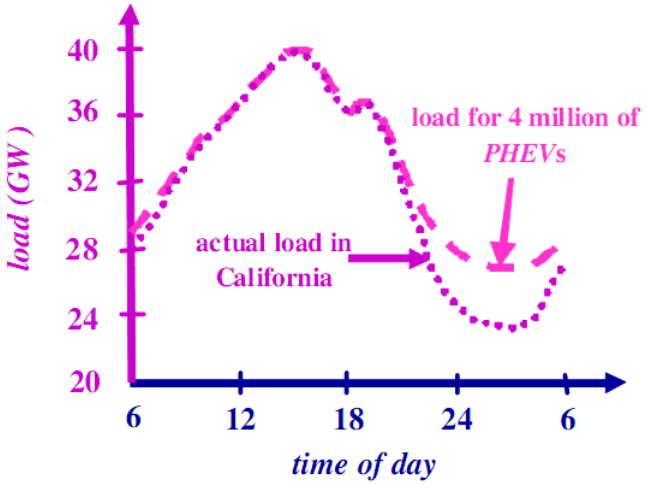
در شبکه‌های هوشمند تسهیلات مختلفی برای خودروهای برقی نظیر پارکینگ‌های مجهز به شارژر و نیز ایستگاه‌های شارژ سریع ایجاد می‌شود. این مراکز به منظور کنترل هوشمند فرآیند شارژ باتری، به سیستم‌های مخابراتی و بی‌سیم نیز مجهز می‌باشند. با وجود زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی لازم برای بکارگیری و استفاده بهینه از خودروهای برقی در یک شبکه هوشمند، امکان استفاده از خودروهای برقی در جهت پشتیبانی از شبکه تسهیل می‌شود. طراحان شبکه‌های هوشمند، استراتژی‌های گوناگونی را برای مدیریت شارژ این خودروها و استفاده از انرژی ذخیره شده در باتری آنها برای کنترل شبکه‌های قدرت ارائه نموده‌اند [۱۸, ۱۹, ۲۷].

یکی از مشکلات اصلی صنعت برق تامین توان مورد نیاز در زمان اوج مصرف می‌باشد. در این ساعات شبکه ناگزیر به استفاده از واحدهای تولیدی با راندمان پایین نظیر نیروگاه‌های گازی است. در نتیجه هزینه برق تولیدی در این ساعات بیشتر خواهد بود. از آنجا که این نیروگاه‌ها برای مدت زمان کوتاهی در شبانه‌روز به شبکه متصل شده و مجددا خاموش می‌شوند باید دارای هزینه راه‌اندازی کم باشند.

مسائل متعدد استفاده از نیروگاه‌های پیک، باعث شد تا طراحان شبکه‌های قدرت به روش‌هایی برای کاهش قله‌های منحنی بار و هموارتر نمودن آن روی آورند. بعضی از این روش‌ها شامل برنامه‌های مدیریت سمت مصرف [1] از قبیل جابجایی بار[2] می‌باشد. در سمت تولید نیز استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی مانند نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای[3] مورد توجه قرار گرفت. این نیروگاه‌ها دارای دو سد جداگانه آبی با اختلاف ارتفاع قابل توجه می‌باشند. در ساعات کم‌باری انرژی از شبکه دریافت شده و با انتقال آب از سد پایین به سد بالا به صورت انرژی پتانسیل در آب پشت سد ذخیره می‌شود. انرژی ذخیره شده در این آب در ساعات اوج مصرف با برگشت آب به سد پایین به انرژی الکتریکی تبدیل شده و به شبکه تزریق می‌شود. بدین ترتیب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای می‌تواند منحنی بار شبکه را هموارتر سازد.

تجمع V2Gها را می‌توان به عنوان یک نیروگاه مجازی در نظر گرفت که با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در باتری خودروها، می‌تواند عملکردی مشابه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای داشته و به هموارتر شدن منحنی بار کمک کند. ضمن آنکه این نیروگاه مجازی دارای سرعت راه‌اندازی بالا و هزینه راه‌اندازی بسیار پایین می‌باشد. در شکل زیر نمونه‌ای از عملکرد V2Gها در هموارتر کردن منحنی بار شبکه نشان داده شده است.

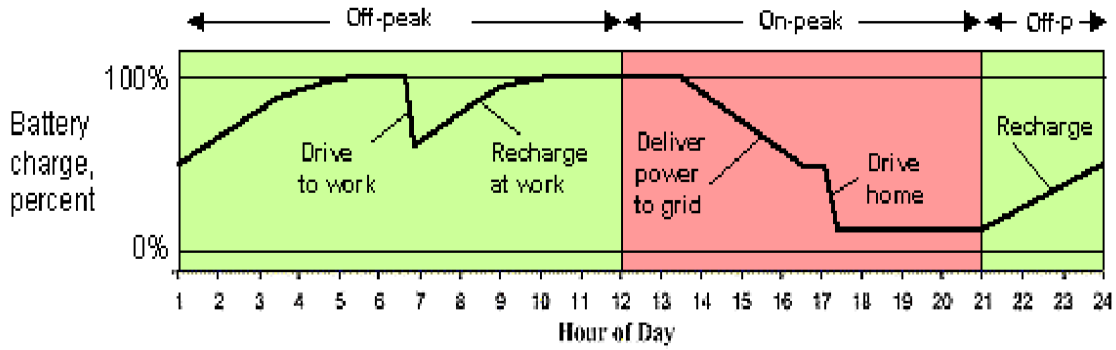
[1] Demand Side Management
[2] Load Shifting
[3] Pumped-storage




شکل۲-۱۱: تاثیر V2Gها بر منحنی بار یک روز تابستانی در کالیفرنیا [۲۰]

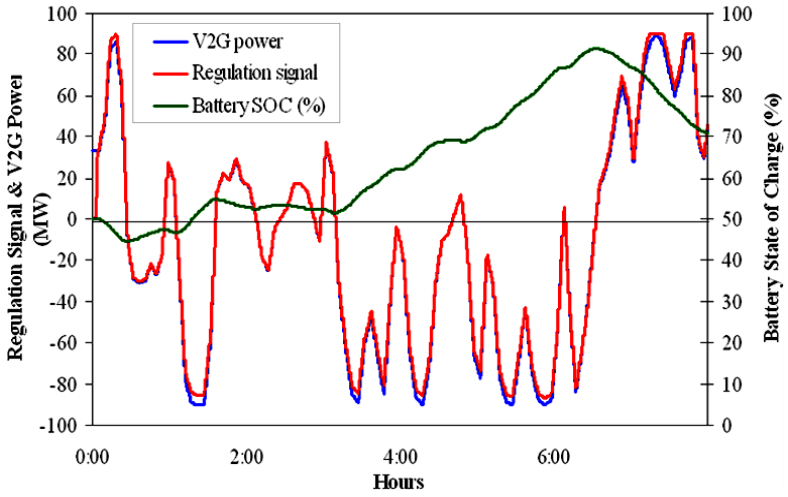
لازم به ذکر است که استفاده از خودروهای برقی برای هموارتر کردن منحنی بار شبکه، در کاربرد اصلی این خودروها به عنوان یک سیستم حمل و نقل خللی وارد نمی‌کند. در واقع همیشه بخشی از انرژی ذخیره شده در باتری برای نیاز روزانه خودرو نگهداری شده و از مابقی شارژ باتری که پیش‌بینی می‌شود در هنگام ورود بعدی خودرو به پارکینگ همچنان در باتری وجود داشته باشد، برای پشتیبانی شبکه و هموارتر کردن منحنی بار استفاده می‌شود. در شکل زیر نمونه‌ای از وضعیت شارژ باتری یک خودرو نشان داده شده است که علاوه بر رانندگی معمول روزانه، در پشتیبانی شبکه نیز شرکت می‌کند. به عبارت دیگر هنگامی‌که صاحب خودرو از ساعت ۹ شب تا ۶ صبح خودروی خود را در پارکینگ منزل قرار می‌دهد، باتری خودروهای خود را از طریق اتصال به شبکه شارژ می‌کند. سپس حدودا بین ساعت ۶ تا ۷ بامداد به محل کار خود می‌رود و از انرژی ذخیره شده در باتری کم می‌شود. از ساعت ۷ تا ۱۰ صبح با اتصال مجدد خودرو در پارکینگ محل کار، باتری خودروی برقی شروع به شارژ می‌کند و در شکل ۲-۱۲ به وضعیت شارژ قبلی خود می‌رسد. اکنون در هنگام نیاز که در اینجا بین ساعت ۲ تا ۵ عصر در نظر گرفته شده است، از شارژ موجود در باتری خودروها استفاده می‌شود و به شبکه توان تزریق می‌شود و به این طریق در پشتیانی از آن مشارکت خواهد داشت. اما هنوز مقدار شارژ باقیمانده در باتری خودرو به میزانی است که صاحب خودرو بتواند به منزل برگردد. از آنجائی‌که

معمولا در ساعت ۵ تا ۶ عصر ، پیک بار شبکه اتفاق می‌افتد شارژ مجدد باتری خودروهای برقی برای به ساعت ۹ شب به تعویق خواهد افتاد.

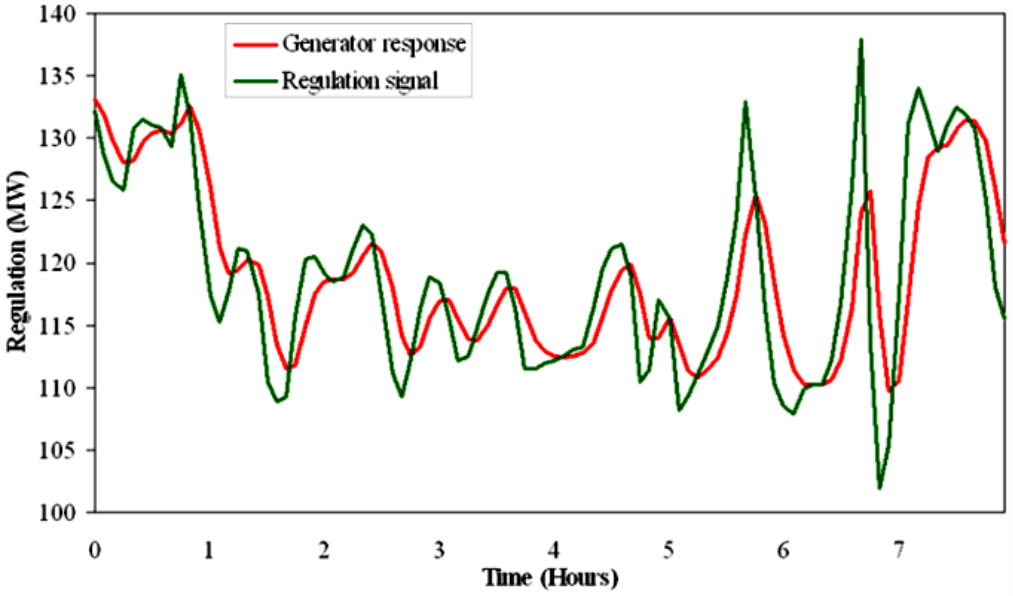



شکل۲-۲ : تاثیر هموار کردن منحنی بار توسط خودروی برقی در وضعیت شارژ باتری خودرو [۱۸]

در مقایسه با نیروگاه‌های خیلی بزرگ، V2Gها عملکرد نسبتا بهتری در فراهم نمودن سرویس‌های خدمات جانبی دارند. نیروگاه‌های معمول دارای محدودیت‌هایی در نرخ افزایش توان می‌باشند. به همین دلیل سرعت عمل این نیروگاه‌ها برای تغییر توان خروجی تا حدی کند می‌باشد [۲۸]. در صورتی که خودروهای برقی، انرژی الکتریکی را در باتری خود ذخیره کرده و با استفاده از مدارهای واسطه الکترونیک قدرت، تقریبا به طور همزمان با سیگنال فرمان تغییر توان، پاسخ خواهند داد. در شکل‌های زیر سرعت پاسخ یک نیروگاه بخار با نرخ افزایش توان ۴٪ با یک نیروگاه مجازی متشکل از مجموعه‌ای از V2Gها مقایسه شده است.




شکل۲-۱۳: پاسخ V2G به سیگنال تنظیم توان [۲۳]




شکل۲-۱۴: پاسخ یک نیروگاه بخار ۲۵۰ مگاواتی به سیگنال تنظیم توان [۲۳]

## فصل سوم

# پیشینه تحقیقات انجام شده

# در زمینه کاربرد خودروهای برقی

# درکنترل فرکانس

با معرفی ساختار خودروهای برقی و عملکرد این خودروها می‌توان به قابلیت‌های ویژه آنها پی برد. از سوی دیگر با توسعه یافتن شبکه‌های هوشمند و فراهم آمدن تجهیزات لازم برای بکارگیری خودروهای برقی، استفاده از این خودروها با گسترش روزافزون مواجه شده است. بگونه‌ای که از نوع خاصی از این خودروها با عنوان V2Gها در جهت پشتیبانی از شبکه در موارد مختلف استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای مهم V2Gها در شرایط غیر منتظره در زمینه کنترل فرکانس شبکه می‌باشد. با توجه به پاسخگویی بسیار سریع V2Gها توانایی آنها برای کنترل فرکانس شبکه نسبت به دیگر نیروگاه‌های معمول محرز می‌باشد. تاکنون نیز تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از V2Gها به منظور کنترل فرکانس شبکه قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این فصل پس از تشریح نحوه نوسانات فرکانس و روش‌های سنتی تنظیم آن به مرور مختصری بر مراجع و مقالات گذشته در زمینه پیدایش خودروهای برقی و کاربردهای متعدد آنها در شبکه قدرت هوشمند نیز پرداخته می‌شود.

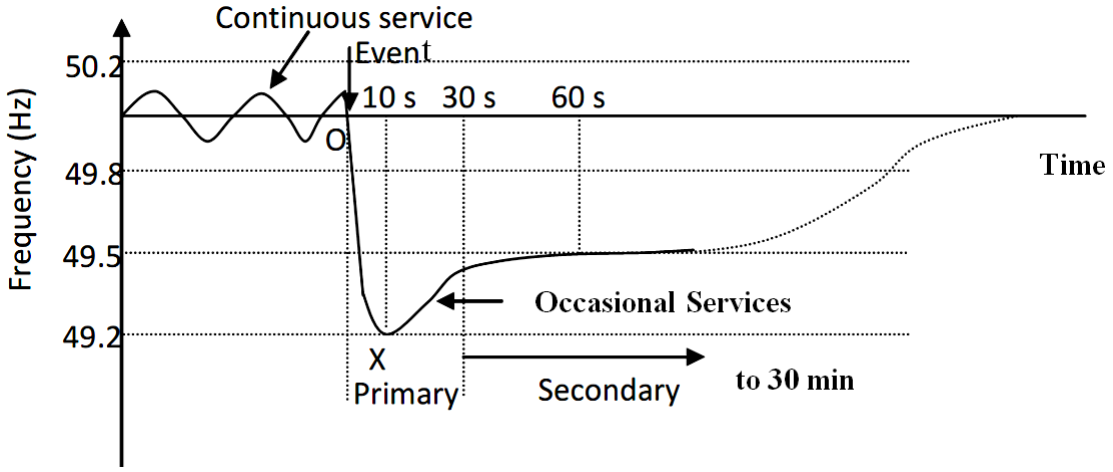
## ۳-۱. کنترل فرکانس در شبکه‌های قدرت

به طور کلی در یک شبکه قدرت حفظ تعادل میان بار و تولید الزامی است. در غیر اینصورت بهره‌برداری از سیستم قدرت دشوار می‌شود و در بعضی مواقع موجب ناپایداری و حتی فروپاشی شبکه خواهد شد. تعادل میان بار و تولید برای حفظ فرکانس شبکه ضروری به نظر می‌رسد. به طوریکه اگر میزان تولید از مقدار بار شبکه بیشتر شود، فرکانس شبکه افزایش خواهد یافت. در صورتی که میزان تولید از بار کمتر شود، فرکانس شبکه کاهش پیدا می‌کند.

در شرایط دینامیکی و گذرا نظیر خروج واحدهای تولیدی، تغییر ناگهانی بار و ... فرکانس شبکه دچار نوسان خواهد شد. برای حفظ پایداری شبکه قدرت در این شرایط، نوسانات فرکانس توسط کنترل‌کننده‌های ویژه‌ای میرا می‌شوند. در این شرایط بهره‌گیری از حلقه کنترل بار فرکانس (LFC[1]) می‌تواند مفید می‌باشد [۲۹].

در صورتی که تغییرات فرکانس از یک مقدار معینی بیشتر شد، کنترل‌کننده‌ها برای تغییر توان ورودی به سیستم فعال می‌شوند و این مرحله اصطلاحا کنترل اولیه فرکانس نامیده می‌شود. مراحل مختلف کنترل فرکانس در شکل ۳-۱ نشان داده شده است که در ادامه تشریح خواهد شد. مرحله اولیه کنترل فرکانس حدود ۱۰ ثانیه پس از وقوع حادثه آغاز می‌گردد و می‌تواند تا ۲۰ ثانیه بعد از آن نیز ادامه داشته باشد. کنترل اولیه فرکانس توسط حلقه کنترلی LFC صورت می‌گیرد. پس از آنکه کنترل‌کننده‌های موجود اغتشاش به وجود آمده را اصلاح کردند، سیستم دوباره متعادل می‌گردد اما هنوز فرکانس سیستم از مقدار نامی خود فاصله دارد. در این مرحله واحدهای تولید شبکه وظیفه برگرداندن فرکانس سیستم به مقدار مطلوب را بر عهده دارند و فرکانس را به مقدار مطلوب می‌رسانند. این مرحله کنترل ثانویه فرکانس می‌باشد. این مرحله ۳۰ ثانیه پس از وقوع خطا شروع شده و می‌تواند تا ۳۰ دقیقه بعد از آن ادامه داشته باشد [۳۰].

[1] Load Frequency Control




شکل۳-۱: یک نمونه انحراف فرکانس بعد از دست دادن ۱۳۲۰ مگاوات تولید [۳۰]

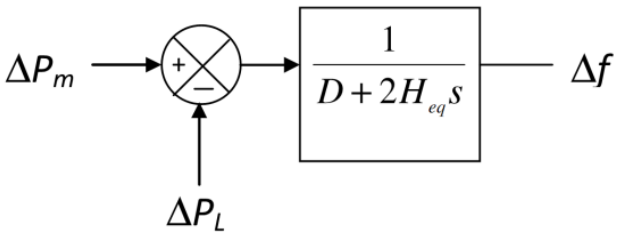
سیستم قدرت طبیعتی غیر خطی و متغیر با زمان دارد. برای بررسی و تحلیل پاسخ فرکانسی سیستم قدرت نسبت به اغتشاشات بار می‌توان از مدل خطی شده سیستم استفاده کرد. در یک توربین ژنراتور رفتار دینامیک کلی بار- تولید و انحراف فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود [۳۱]:

$$2H\frac{d\Delta f}{dt}+D\Delta f=\Delta P_m-\Delta P_e \qquad (۱-۳)$$

که در آن $\Delta f$ انحراف فرکانس، $\Delta P_m$ انحراف توان مکانیکی و $\Delta P_e$ میزان تغییرات بار می‌باشد. ثابت اینرسی با H و ثابت میرایی با D نشان داده شده است. با تبدیل لاپلاس گرفتن از معادله (۳-۱) رابطه زیر حاصل می‌شود:

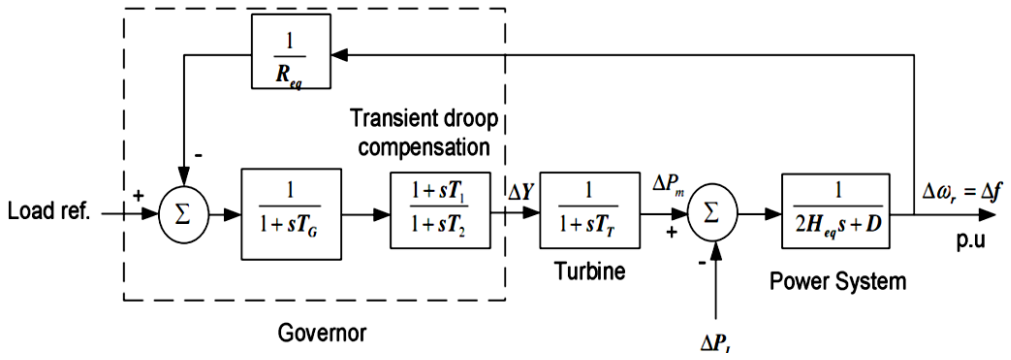
$$2HS\Delta f(s)+D\Delta f(s)=\Delta P_m(s)-\Delta P_e(s) \qquad (۲-۳)$$

می‌توان معادله بالا را به صورت بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل زیر نمایش داد:



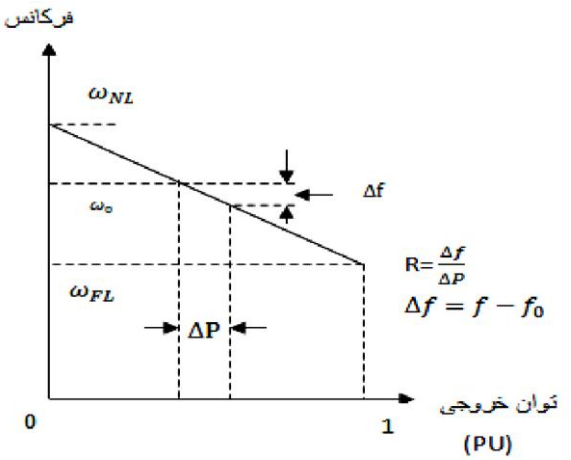

شکل۳-۲: بلوک دیاگرام مدل توربین ژنراتور [۳۱]

در شکل زیر مدل ساده‌ای از حلقه کنترلی بار فرکانس همراه با نحوه کارکرد آن توسط مدل‌های دینامیکی ساده شده سیستم قدرت نشان داده شده است.



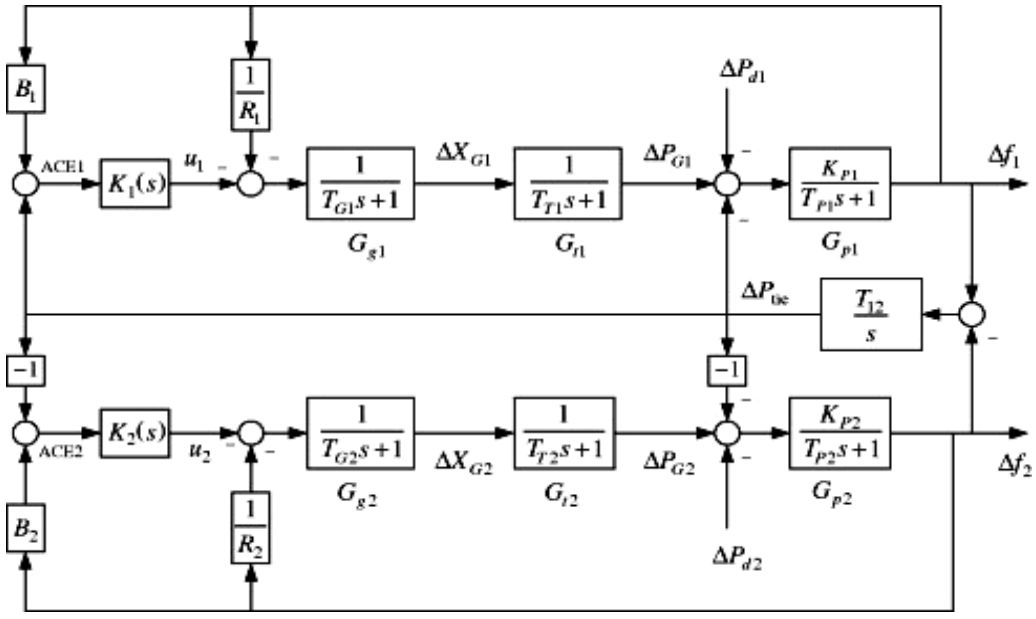

شکل۳-۳: مدل ساده شده حلقه کنترل بار فرکانس [۳۱]

گاورنرها یکی دیگر از کنترل‌کننده‌های موثر در کنترل فرکانس شبکه در مواقع لزوم می‌باشند. گاورنر سرعت مکانیکی را اندازه‌گیری می‌کند و کنترل لازم جهت تغییر توان خروجی مکانیکی را بگونه‌ای تنظیم می‌کند که تغییر بار را جبران کرده و فرکانس را به مقدار اسمی برمی‌گرداند. در شکل زیر نحوه پاسخ‌گویی واحدهای تولیدی به تغییر فرکانس سیستم نشان داده می‌شود. شیب این منحنی نشان‌دهنده مشخصه دروپ (ضریب تنظیم سرعت) نیروگاه‌ها می‌باشد که با R نمایش داده می‌شود که مقدار R توسط اپراتور تنظیم می‌گردد. به عنوان مثال اگر R روی ۸٪ انحراف تنظیم شود یعنی ۸٪ انحراف فرکانس، توان خروجی را به میزان ۱۰۰٪ تغییر می‌دهد و یا بالعکس، ۱۰۰٪ تغییر بار (مثلا دو برابر شدن میزان بار) باعث تغییر فرکانس به میزان ۸٪ می‌شود.




شکل۳-۴: مشخصه ایده‌آل حالت ماندگار گاورنر با شیب افتی سرعت [۳۱]

پس از معرفی LFC و گاورنر، نحوه تشخیص تغییر فرکانس مشخص می‌گردد و این که با تغییر نقطه بار مرجع در واحدهای مختلف سیستم می‌توان فرکانس را به مقدار اولیه بازگرداند. حال باید متذکر شد که تغییر نقطه بار مرجع به دو روش امکان‌پذیر است. در حالت اول مرکز دیسپاچینگ[1] دستور تغییر نقطه کار در واحدهای مختلف را به اپراتورها می‌دهد. اپراتورها نیز به صورت دستی این تغییر را اعمال می‌کنند. در این قسمت تغییر بار در هر محل طوری صورت می‌گیرد که با واحدهای همان محل جبران گردد تا توان انتقالی بین خطوط به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکند. در حالت دوم این تغییر به صورت اتوماتیک توسط یک حلقه کنترلی ناظر انجام می‌شود. به این حلقه، حلقه کنترل تولید اتوماتیک (AGC[2]) گفته می‌شود [۳۱]. در واقع کنترل اولیه باعث ایجاد یک فرکانس جدید و متفاوت از فرکانس نامی (در پاسخ به انحرافات تصادفی بار و تولید) می‌شود. در این شرایط کنترل ثانویه وارد عمل خواهد شد. بدین ترتیب AGCها فرکانس سیستم را به مقدار نامی برمی‌گردانند. شکل زیر نمایش بلوکی سیستم AGC برای یک سیستم با دو ناحیه نشان داده می‌شود.




شکل۳-۵: نمایش بلوکی سیستم AGC برای یک سیستم با دو ناحیه [۲۹]

[1] Dispatching
[2] Automatic Generation Control

در سیستم‌های چند ناحیه‌ای، LFC علاوه بر وظیفه کنترل فرکانس، تبادل توان خطوط ارتباطی[1] بین دو ناحیه را نیز کنترل می‌نماید. در یک سیستم چند ناحیه‌ای، نواحی مجزا به وسیله خطوط انتقال به هم متصل می‌باشند. در این سیستم انحراف فرکانس در هر ناحیه نه تنها ناشی از تغییرات بار آن ناحیه می‌باشد بلکه تغییرات توان خطوط انتقالی بین ناحیه‌ای نیز در آن تاثیرگذار می‌باشد. کنترل بار فرکانس در هر ناحیه علاوه بر مسئولیت کنترل فرکانس در هر ناحیه، توان انتقالی خطوط را نیز کنترل می‌کند. لذا کنترل ثانویه بایستی انحراف توان عبوری از خطوط بین ناحیه‌ای را به صفر برساند. این امر با اضافه کردن یک سیگنال جدید در حلقه کنترل فیدبک انجام می‌پذیرد. ترکیب خطی مناسب از انحراف توان و انحراف فرکانس به عنوان سیگنال خطای ناحیه کنترل (ACE[2]) تعریف می‌شود. سیگنال ACE پس از محاسبه وارد کنترل‌کننده $K(s)$ می‌شود. سیگنال کنترلی تولیدی به توربین گاورنر مورد نظر اعمال می‌شود. لذا دیاگرام کنترلی پیشنهادی علاوه بر تامین اهداف اولیه کنترل بار فرکانس، مقدار توان عبوری از خطوط و همچنین فرکانس ناحیه را به مقدار مشخص شده برگرداند.

## ۳-۲. مروری بر تحقیقات گذشته

در سال‌های اخیر مسائل نگران‌کننده ناشی از مشکلات استفاده از خودروهای درونسوز باعث پیشرفت روزافزون خودروهای برقی شده است. نکته قابل توجه آنکه کاربرد گسترده خودروهای برقی و استفاده موثر از آنها در شبکه‌های قدرت سنتی میسر نخواهد بود. شبکه‌های هوشمند به عنوان چشم‌انداز آینده سیستم‌های قدرت محسوب شده و حاصل سعی و تلاش متخصصین جهت مدرنیزه نمودن و خودکار نمودن شبکه‌های برق می‌باشد. این شبکه قادر خواهد بود خود را کنترل و پایش نموده، از خود محافظت کند و به صورت خودکار بهره‌برداری از اجزای متصل به خود را بهینه سازد. مهم‌ترین

[1] Tie-line
[2] Area Control Error

اجزای متصل به یک شبکه قدرت هوشمند شامل نیروگاه‌های بزرگ، تولیدات پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم‌های اتوماسیون، کاربران صنعتی، سیستم‌های توزیع و مصرف‌کنندگان نهایی می‌باشند. خودروهای برقی نیز می‌توانند به عنوان یکی از اجزای متصل به شبکه هوشمند مطرح شوند. در این شبکه‌ها، منابع و سرویس‌هایی که قبلا به صورت جداگانه مدیریت می‌شدند، هم‌اکنون به صورت یکپارچه مدیریت شده واین ساختار جدید موجب صرفه‌جویی در تعمیرات، نگهداری و برنامه‌ریزی سیستم قدرت شده و دارای بازدهی بیشتری نسبت به شبکه‌های سنتی خواهد بود [۳۲]. تفاوت اساسی شبکه‌های هوشمند با شبکه‌های امروزی، گسترش و پیشرفت قابل توجه تکنولوژی ارتباطات در این شبکه‌ها است. به طور کلی به کار بردن تکنولوژی‌های پیشرفته مبتنی بر اطلاعات و ارتباطات برای افزایش انعطاف‌پذیری، قابلیت اطمینان و کارایی شبکه قدرت مفید می‌باشد و نیز نرخ نیاز به زیرساخت‌های سیستم قدرت را کاهش می‌دهد.

طراحان شبکه‌های هوشمند، تکنولوژی این شبکه را حول سه محور اصلی مشترکین، تجهیزات و ارتباطات مطرح نموده‌اند. تکنولوژی هوشمند توانایی ایجاد تغییرات اساسی در تولید، انتقال، توزیع و در نهایت استفاده از انرژی الکتریکی را به همراه خواهد داشت. با پیاده‌سازی این تکنولوژی، منافع اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی نیز حاصل می‌گردد. این سیستم به عموم مشترکین امکان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها که حداقل آسیب را به محیط زیست می‌رساند، می‌دهد. در این شبکه‌ها جایگاه نیروی انسانی بسیار کمرنگ می‌شود. به عنوان مثال در سمت مصرف‌کننده، مشترکین خانگی و تجاری از طریق سیگنال‌های ارسالی به قیمت انرژی و شرایط تولید و مصرف در شبکه پی خواهند برد. در نمونه‌های اجرایی دیگر، شرکت‌ها اجازه دارند در ساعاتی که قیمت انرژی بالاست، مصرف مشترک را به طور خودکار کاهش دهند. این نتیجه ارتباطات دوطرفه بین تجهیزات، مصرف‌کننده‌ها و ناظرهای هوشمند است که مدیریت و هدایت می‌شوند.

از دیگر ویژگی‌های شبکه‌های هوشمند، مونیتورینگ لحظه‌ای وضعیت شبکه، بهبود آشکارسازی اختلالات شبکه، پاسخ خودکار به بعضی خطاهای شبکه، جداسازی نواحی آسیب‌دیده به صورت

خودکار به منظور جلوگیری از خاموشی‌های گسترده، مدیریت هوشمند رله‌ها، کلیدها و سایر تجهیزات حفاظتی شبکه و ... می‌باشد. کنترل وضعیت اتصال و توان نیروگاه‌های جدید نظیر نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در ابعاد بزرگ نیز از توانایی‌های این شبکه می‌باشد. به طور مشابه یک شبکه هوشمند قادر به مدیریت اتصال و وضعیت شارژ میلیون‌ها خودروی الکتریکی موجود در شبکه نیز خواهد بود. با توجه به مباحث مطرح شده، استفاده از خودروهای برقی بویژه در شبکه‌های قدرت هوشمند از لحاظ اقتصادی و منافع زیست‌محیطی کاملا عملی و توجیه‌پذیر خواهد بود.

شاید بتوان ظهور خودروهای برقی را به بیش از ۱۰۰ سال قبل منسوب کرد. البته رشد چشم‌گیر این خودروها در اواخر قرن بیستم آغاز شد. در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰ ویلت کمپتون[1] و همکارانش تحقیقات زیادی در مورد سیستم‌های حمل و نقل برقی و معرفی خودروهای برقی (EV) انجام دادند [۳۳, ۳۴]. در سال ۲۰۰۱ آقای بروکس[2] به همکاری کمپتون و سایر افراد گزارشی مبتنی بر معرفی انواع خودروهای الکتریکی برای شرکت حمل و نقل کالیفرنیا تهیه نمودند. در این گزارش استفاده از خودروهای برقی در وضعیت پارک و امکان تزریق توان به شبکه، مطرح شده بود [۱۸, ۳۵]. در سال ۲۰۰۵ کمپتون تحقیق جالبی در مورد مزایای حذف خودروهای درونسوز و جایگزینی این قبیل خودروها با خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه انجام داد [۳۶]. سپس در همان سال کمپتون و جاسنا تامیک[3] با معرفی انواع خودروهای برقی فرصت پا به عرصه گذاشتن نوع خاصی از خودروهای برقی با عنوان V2G را فراهم نمودند. پس از معرفی انواع بازارها و ساز و کار مربوط به آنها، بازارهای مناسب مرتبط با V2G را با توجه به قابلیت‌ها و ویژگی‌های آنها بیان نمودند. در واقع با استفاده از معادلات به محاسبه ظرفیت این خودروها و سود حاصل از مشارکت آنها در بازار پرداخته شد [۹]. در ادامه این تحقیق مقاله دیگری از این نویسندگان منتشر شد که در آن از خودروهای برقی به عنوان

[1] Willet Kempton
[2] Brooks
[3] Jasna Tomic

منابع انرژی تجدیدپذیر یاد شده و در فراهم نمودن خدمات جانبی از انرژی ذخیره شده در این خودروها استفاده شده است [۱۴]. در سال ۲۰۰۷ آقای کمپتون و همکارانش بار دیگر حرکتی نوین را آغاز نمودند. آنها با در نظر گرفتن کمینه مقدار توان پیشنهادی برای شرکت در بازارهای خدمات جانبی در بازارهای PJM[1] و کالیفرنیا به این نتیجه رسیدند که با تعداد نسبتا کمی از خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه می‌توان در این بازارها شرکت نمود [۳۷]. آنان به بحث و محاسبه سود حاصل از شرکت دو نوع خودروی برقی با مشخصات و ظرفیت باتری متفاوت در بازار خدمات جانبی به منظور تنظیم فرکانس پرداختند [۱۹]. این تحقیقات حاکی از آن است که کمپتون و تامیک با معرفی قابلیت‌های خودروهای برقی عرصه جدیدی را در سیستم حمل و نقل به نمایش گذاشتند. در همان سال کریستف‌گیل[2] برای اولین بار یک چارچوب پیشنهادی به منظور استفاده موثر از تجمیع خودروهای برقی به عنوان بار قابل کنترل برای هموار کردن منحنی بار در زمان غیر پیک و یا به عنوان منبع تولید انرژی یا ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در فراهم کردن سرویس‌های انرژی در جهت پشتیبانی شبکه [۲۰] مطرح ساخت. همچنین برنامه‌های تشویقی برای صاحبان خودروها و نیز زیرساخت‌های ارتباطی رادیویی و مخابراتی را تحلیل کرد [۲۰]. سرانجام آینده مبهمی از نهاد تجمیع‌کننده V2Gها با عنوان نهاد گردهم‌آورنده[3] در این سال معرفی شد.

در سال ۲۰۰۸ کمپتون و همکارانش V2G را در سیستم PJM به عنوان منبع ذخیره انرژی و تنظیم فرکانس مورد بررسی قرار دادند [۳۸]. در همان سال هوتسون[4] روشی برای استفاده از انرژی ذخیره شده در V2Gها با فرض نامشخص بودن تعداد خودروهای متصل به شبکه و وضعیت شارژ آنها ارائه کرد [۳۹]. در سال ۲۰۱۰ صابر[5] برای اولین بار در مدار قرار گرفتن واحدها با حضور V2G را مورد بررسی قرار داد. نتیجه این بررسی افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش

[1] Pennsylvania-New Jersey-Maryland
[2] Christophe Guille
[3] Aggregator
[4] Hutson
[5] Saber

سود و درآمد بود. در سال ۲۰۱۰ هان[1] و همکارانش و نیز در سال ۲۰۱۱ کریستوفرسن[2] به بررسی و مقایسه درآمد حاصل از شارژ باتری V2Gها و درآمد بدست آمده توسط نهاد گردهم‌آورنده از شرکت در بازار تنظیم فرکانس پرداخته‌اند. همچنین الگوریتم‌هایی برای ماکزیمم کردن سود با مصالحه بین این درآمدها ارائه نمودند [۴۰, ۴۱]. در تمام مراجع مذکور زمان اتصال و قطع خودروها از شبکه به صورت تصادفی فرض شده است که باعث عدم دقت در به دست‌آوردن نتایج می‌شود. برای حل این مسئله که به یک مشکل جدی تبدیل شده بود، در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ روش‌هایی برای برنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده براساس پیش‌بینی و مدلسازی رفتار مالکان V2G ارائه شد [۴۲, ۴۳]. البته در این الگوریتم مدلی برای پیش‌بینی تعداد خودروهای متصل به شبکه، رعایت حداقل سطح شارژ باتری و حداقل زمان اتصال خودروها به شبکه، در نظر گرفته نشده است. در سال ۲۰۱۱ مدلی برای پیش‌بینی وضعیت شارژ باتری خودروها (SOC) در ساعات مختلف شبانه‌روز ارائه شد. سپس پیشنهاد انرژی نهاد گردهم‌آورنده برای شرکت در بازار با توجه به این مدل و انرژی موجود برنامه‌ریزی شد. البته در این برنامه‌ریزی، هزینه انرژی مصرف شده برای شارژ باتری‌ها در نظر گرفته نشده است [۴۴, ۴۵]. آخرین وضعیت این بحث را می‌توان در اسناد منتشر شده در سال ۲۰۱۲ جستجو کرد که در آن با در نظر گرفتن بسیاری از موارد فوق، برنامه بهینه برای نهاد گردهم‌آورنده با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار، ارائه شد [۴۶].

به طور کلی تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از خودروهای برقی برای پشتیبانی شبکه نظیر کنترل فرکانس، به سمت ارائه یک برنامه‌ریزی بهینه برای نهاد واحد گردهم‌آورنده این خودروها، پیش رفته است. در تمامی این تحقیقات، امکان حضور چندین نهاد گردهم‌آورنده و رقابت آنها برای کسب سود ماکزیمم در یک محیط تجدید ساختار یافته، مساله‌ای است که تاکنون دور از نظر مانده است. در

[1] Han
[2] Kristoffersen

این پایان‌نامه علاوه بر شبیه‌سازی و بررسی حالات دینامیکی کنترل فرکانس شبکه توسط خودروهای برقی، به ارائه یک برنامه‌ریزی بهینه برای نهاد گردهم‌آورنده در یک محیط رقابتی پرداخته شده است.

## فصل چهارم

# قابلیت خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه‌های هوشمند

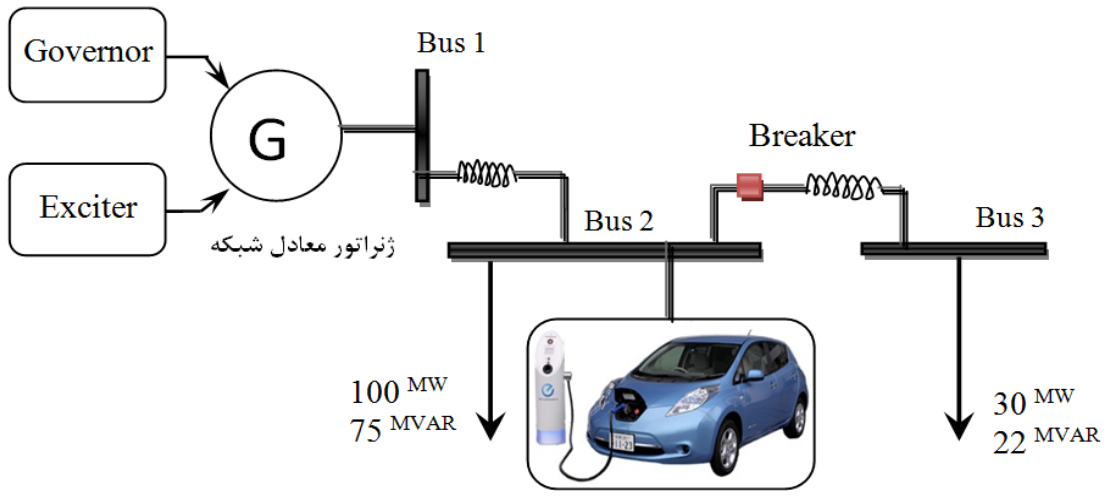
همانگونه که در فصل قبل بیان شد خودروهای برقی در مدت زمان قابل توجهی از شبانه‌روز در پارکینگ حضور دارند. در این مدت خودرو با یک مدار واسطه دو جهته به شبکه متصل بوده و لذا امکان شارژ یا دشارژ باتری آن توسط شبکه فراهم است. از سوی دیگر خودروهای برقی دارای سرعت پاسخ بسیار بالایی در مقابل تصمیمات شبکه برای شارژ یا دشارژ می‌باشند. این خصوصیات، قابلیت‌های ویژه‌ای را در خودروهای برقی برای پشتیبانی شبکه ایجاد می‌کند. کنترل فرکانس یکی از ملزومات هر شبکه قدرت است که نیازمند منابعی با توان نسبتا بالا و سرعت پاسخ سریع می‌باشد. در این فصل به بررسی امکان کنترل فرکانس یک شبکه کوچک ایزوله با استفاده از خودروهای برقی موجود در شبکه، پرداخته شده است. در این مطالعه تمامی خودروهای برقی به صورت یکجا فرض شده و با یک باتری بسیار بزرگ که به یکی از باس‌های سیستم متصل می‌شود، مدل‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر قابلیت خودروهای برقی برای کنترل فرکانس شبکه هنگام بروز اغتشاشات می‌باشد.

## ۴-۱. تجمیع و مدلسازی خودروهای برقی در شبکه قدرت

هر خودروی برقی دارای مقداری انرژی ذخیره شده در باتری خود می‌باشد. این انرژی به تنهایی در مقایسه با کل انرژی مصرفی در شبکه قدرت بسیار ناچیز و نامحسوس است. چنانچه قرار باشد خودروهای برقی به عنوان تامین‌کننده بخشی از توان شبکه در هنگام بروز اغتشاشات و کنترل فرکانس شبکه مورد استفاده قرار گیرند، باید تعداد بسیار زیادی از این خودروها به صورت هماهنگ با شبکه در تعامل باشند. لذا معادل ظرفیت باتری خودروهای برقی موجود، مجموعه خودروهای برقی یکجا به صورت یک باتری خیلی بزرگ با ظرفیت زیاد مدلسازی می‌شود. از آنجا که باتری‌ها می‌توانند در حدود چند میلی‌ثانیه به ماکزیمم توان خروجی خود برسند [۴۷]، دارای قابلیت پاسخ‌گویی بسیار سریع می‌باشند. از سوی دیگر باتری‌ها توسط سخت‌افزارهایی که در خودروها و در پارکینگ‌ها نصب شده است، امکان مبادله توان دوطرفه با شبکه را خواهند داشت. لذا می‌توانند در مواقع لزوم شارژ یا دشارژ شوند. بنابراین در موارد خواسته شده براحتی می‌توان از خودروهای برقی به عنوان یک منبع تولید یا بار قابل کنترل در جهت کنترل فرکانس شبکه استفاده نمود.

## ۴-۲. شبیه‌سازی و مطالعه نمونه

در این بخش به منظور مطالعه تاثیر خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه، یک سیستم قدرت ایزوله با سه باس مطابق شکل زیر در نظر گرفته شده است.




شکل۴-۱: شماتیک کلی سیستم تحت مطالعه

شماتیک کلی سیستم در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. این شبکه دارای یک ژنراتور معادل شبکه در باس یک و بارهای اکتیو و راکتیو در باس‌های ۲ و ۳ می‌باشد. تمامی خودروهای برقی به صورت یک باتری بزرگ و اینورتر در باس ۲ مدل‌سازی شده است. در این شبکه فرض می‌شود به طور متوسط تعداد ۲۰۰۰ خودرو از کل خودروهای برقی شبکه در هر لحظه در دسترس باشند. با فرض اینکه این خودروها دارای شارژ کافی برای پشتیبانی شبکه باشند و ظرفیت باتری هر خودرو برابر $۵۰^{kWh}$ با حداکثر نرخ دشارژ $۰/۲^{pu/h}$ باشد، می‌توان توان باتری معادل کل خودروهای شبکه را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$P_{V2G} = 2000 \times 0.2 \times 50 = 20^{MW}$$

## ۴-۳. مدلسازی سیستم نمونه

برای شبیه‌سازی این سیستم از نرم‌افزار MATLAB/ SIMULINK استفاده شده است. کتابخانه این نرم‌افزار علاوه بر المان‌های معمول سیستم‌های قدرت، دارای المان‌های تعریف شده‌ای مانند ژنراتور سنکرون، باتری DC و انواع اینورترها می‌باشد که باعث تسهیل در شبیه‌سازی سیستم فوق خواهد شد. در ادامه به تشریح مدلسازی و شبیه‌سازی هر یک از المان‌های سیستم پرداخته می‌شود.

### ٤-۳-۱. ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون عامل اصلی پدیده‌های دینامیکی سیستم قدرت است و در واقع رفتار کل سیستم بستگی به نحوه عملکرد آن دارد. ژنراتور یک سیستم الکترومکانیکی است و از دو قسمت الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده است. بخش مکانیکی آن (دینامیک روتور) معمولا با یک معادله دیفرانسیل درجه دو مدلسازی می‌شود ولی در مدلسازی بخش الکتریکی آن بسته به دقت لازم مدل‌های درجه ۵، ۳، ۱ و صفر در نظر گرفته می‌شوند. در این قسمت مدل درجه ۵ برای بخش الکتریکی ماشین سنکرون در نظر گرفته شده است. یک ژنراتور سنکرون از سه سیم‌پیچ a، b و c برای استاتور، یک سیم‌پیچ برای تحریک روی روتور، یک سیم‌پیچ دمپر در راستای محور طولی و دو سیم‌پیچ دمپر در

راستای محور عرضی تشکیل شده است. سیم‌پیچ‌های دمپر روی روتور گسترده است ولی با تقریب به صورت سیم‌پیچ‌های عمود بر هم Q و D[1] در نظر گرفته می‌شوند. با اعمال تبدیل پارک بر روی ولتاژهای استاتور، معادلات زیر به دست خواهند آمد:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}\varphi_d - \omega_R \varphi_q \qquad \varphi_d = L_d i_d + L_{md}\left(i'_{fd} + i'_{kd}\right)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}\varphi_q + \omega_R \varphi_d \qquad \varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}$$

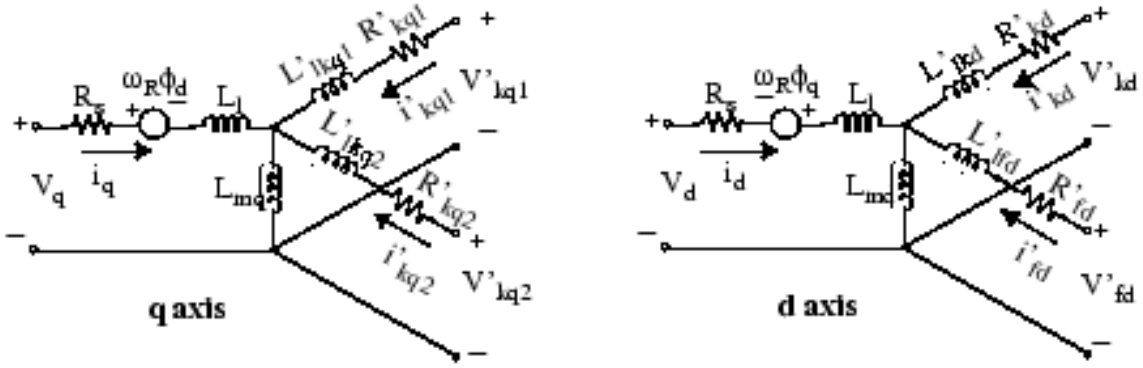
$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt}\varphi'_{fd} \qquad \varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md}\left(i_d + i'_{kd}\right)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kd} \qquad \varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md}\left(i_d + i'_{fd}\right)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kq1} \qquad \varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kq2} \qquad \varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q$$

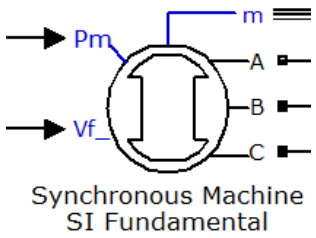
با توجه به معادلات بالا، مدارهای معادل زیر به دست می‌آید:




شکل۴-۲: مدل الکتریکی ماشین

ژنراتور شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک نیز به صورت زیر است که پارامترهای دینامیکی آن با توجه به توان نامی ماشین به صورت نوعی فرض می‌شوند:

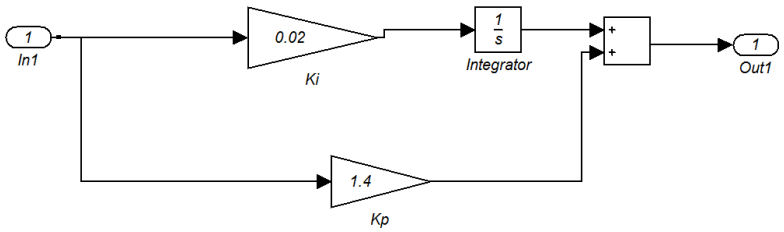
[1] Direct and Quadratic




شکل۴-۳: شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون

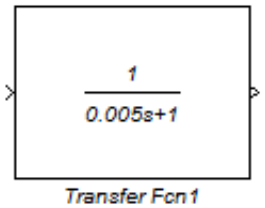
### ٤-۳-۲. کنترل‌کننده ولتاژ و سیستم تحریک

ماشین شبیه‌سازی شده در این قسمت دارای سیستم تحریک‌کننده[1] از نوع بدون جاروبک[2] است که توسط AVR[3] کنترل شده و سیم‌پیچی میدان را تغذیه می‌کند. برای سادگی، مدل سیستم تحریک به صورت یک تابع انتقال درجه اول در نظر گرفته شده است. تنظیم‌کننده ولتاژ، از ولتاژ خروجی ژنراتور نمونه‌برداری کرده و با مقایسه آن با مقدار مرجع، سیگنال خطا را تولید می‌کند. در اینجا از یک کنترل‌کننده PI استفاده شده است. شکل زیر بلوک دیاگرام این کنترلر را نشان می‌دهد:




شکل۴-۴: بلوک دیاگرام کنترلر سیستم تحریک

مدل شبیه‌سازی شده سیستم تحریک در MATLAB نیز به صورت زیر می‌باشد:



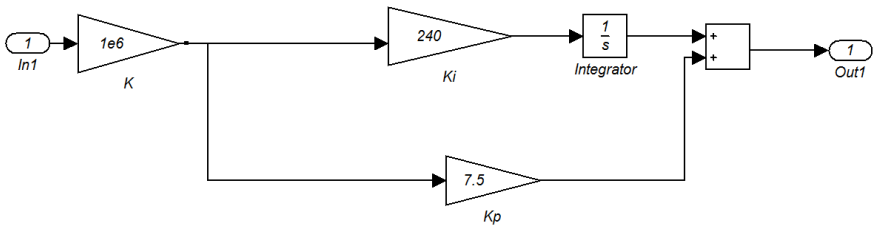

شکل۴-۵: مدل در نظر گرفته شده برای سیستم تحریک

[1] Exciter
[2] Brushless
[3] Automatic Voltage Regulator

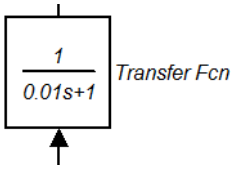
### ٤-٣-٣. گاورنر و توربین

در یک نیروگاه علاوه بر ماشین سنکرون و سیستم تحریک قسمت‌های عمده دیگری مانند توربین، گاورنر و سیستم تغذیه انرژی وجود دارند که هدف آنها تامین انرژی مکانیکی لازم برای ژنراتور سنکرون است تا توان لازم در فرکانس مطلوب در ترمینال ژنراتور به شبکه تزریق گردد. برای بازگرداندن فرکانس شبکه به حالت عادی باید تغییردهنده سرعت نقطه کار توربین را تغییر دهد. این کار اگر خودکار انجام شود، کنترل خودکار تولید[1] می‌نامند. در یک شبکه قدرت تعادل دائمی بین توان تولید و مصرف الزامی است که این وظیفه بر عهده گاورنر است. برای سادگی طرح می‌توان از یک مدل خطی درجه یک برای گاورنر استفاده کرد. بسته به اینکه سیستم تغذیه انرژی، بخار، آب و یا گاز باشد، توربین‌ها به بخار، آبی و گازی تقسیم می‌شوند. که در سیستم شبیه‌سازی شده از یک تابع انتقال درجه اول جهت سادگی سیستم استفاده شده است.

در شکل زیر بلوک دیاگرام کلی سیستم نشان داده شده است:




شکل۴-۶: بلوک دیاگرام گاورنر

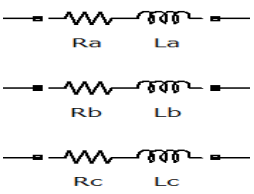



شکل۴-۷: مدل در نظر گرفته شده برای توربین

[1] Automatic Genaration Control (AGC)

### ٤-٣-٤. خط انتقال

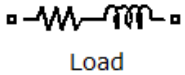
وظیفه یک خط انتقال، انتقال توان الکتریکی از یک نقطه به نقطه دیگر است. بسته به دقت لازم، مدل یک خط انتقال ساده (فشرده) و یا پیچیده (گسترده) است. در مدل گسترده فرض بر این است که مثلا خاصیت خازنی در طول یک خط گسترده است و هر قطعه از خط با زمین و با خطوط دیگر خازن تشکیل می‌دهد که البته در واقعیت نیز چنین است. در مدل فشرده فرض می‌شود که خاصیت خازنی در ابتدا و انتهای خط، به صورت فشرده، قرار دارد که مدل را بسیار ساده می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که دقت این مدل برای مطالعات دینامیکی کافی است. در شکل زیر یک مدل ساده از خط انتقال نشان داده شده است که به صورت یک مقاومت و سلف در نظر گرفته شده است.




شکل۴-۸: مدل خط انتقال

### ٤-٣-٥. بار الکتریکی

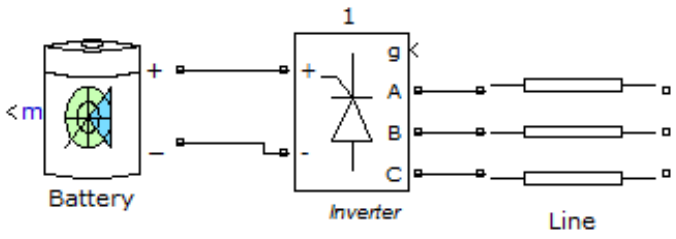
شبیه‌سازی انواع مختلف بارهای مقاومتی، سلفی و خازنی به آسانی با اتصال سری یا موازی مقاومت، سلف و خازن امکان‌پذیر است. از آنجائیکه به طور معمول در یک شبکه قدرت بار می‌تواند هم به صورت اکتیو و هم راکتیو مصرف شود، بار به صورت یک مقاومت و سلف مدلسازی می‌شود.




شکل۴-۹: مدل بار الکتریکی

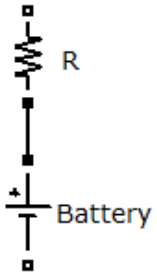
### ٤-٣-٦. V2G

ساختار V2G متشکل از یک باتری و اینورتر سه فاز می‌باشد که در حالت مناسبی به صورت سنکرون با شبکه به آن متصل شده است.



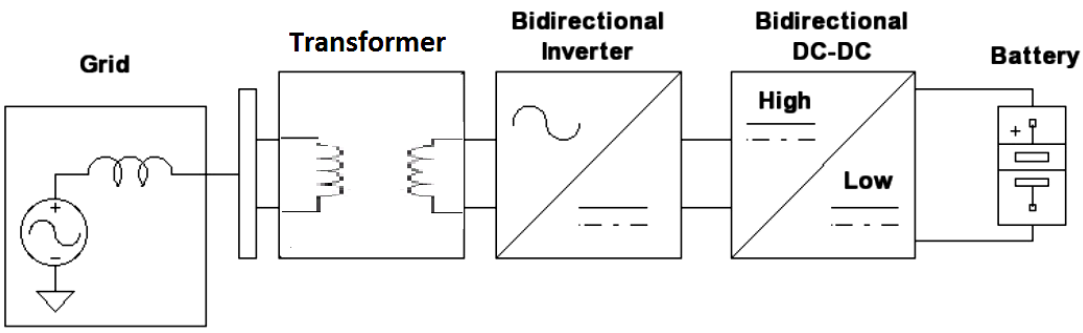

شکل۴-۱۰: مدل ساده شده V2G

در مراجع مختلف [۵۰-۴۸] مدل‌های متفاوتی برای باتری ارائه شده است. اما در این پایان‌نامه باتری به صورت یک منبع DC و امپدانس R مدلسازی شده است. در شکل زیر مدل ساده‌ای از باتری شبیه‌سازی شده در سیستم نمونه نشان داده شده است.



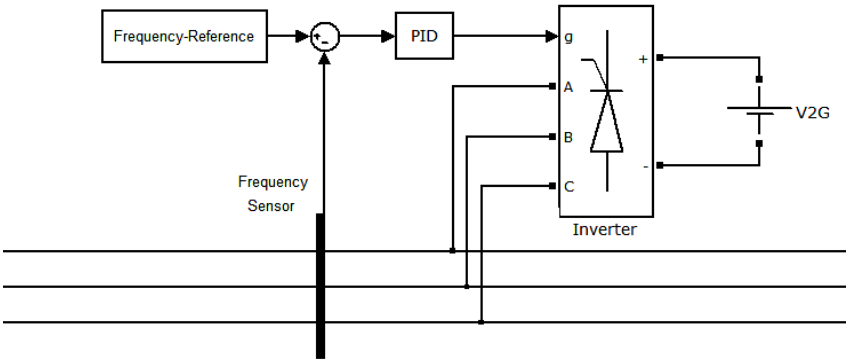

شکل۴-۱۱: مدل ساده شده باتری

ولتاژ باتری خودروهای برقی مقادیر متفاوتی از ۱۸۰ تا ۳۹۰ ولت می‌تواند داشته باشد [۵۱]. باتری توسط یک مبدل DC-DC از نوع Buck-Boost مطابق شکل ۴-۱۲ به اینورتر متصل می‌شود. مبدل DC-DC می تواند ولتاژ باتری را به مقدار دلخواه افزایش یا کاهش دهد. در مدل شبیه‌سازی شده، باتری و مبدل DC-DC به صورت یک باتری با ولتاژ ۸۰۰ ولت فرض شده است.



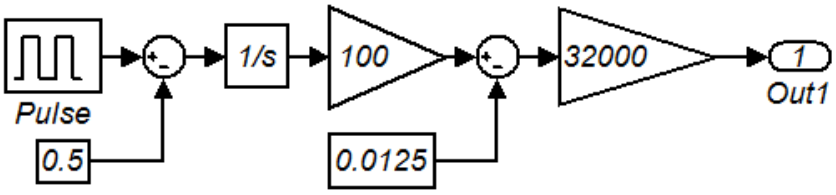

شکل۴-۱۲: شماتیک اتصال خودروی برقی به شبکه

اینورتر شبیه‌سازی شده در باتری V2G دارای یک فیدبک کنترلی از فرکانس سیستم می‌باشد. سیگنال خطا با مقایسه فیدبک فرکانس و فرکانس مرجع برابر با مقدار نامی بدست می‌آید. اینورتر مذکور دارای یک کنترل‌کننده PID نیز می‌باشد که پارامترهای آن با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد مطلوب تنظیم شده است. در شکل زیر شماتیک اینورتر و کنترل‌کننده آن نشان داده شده است.



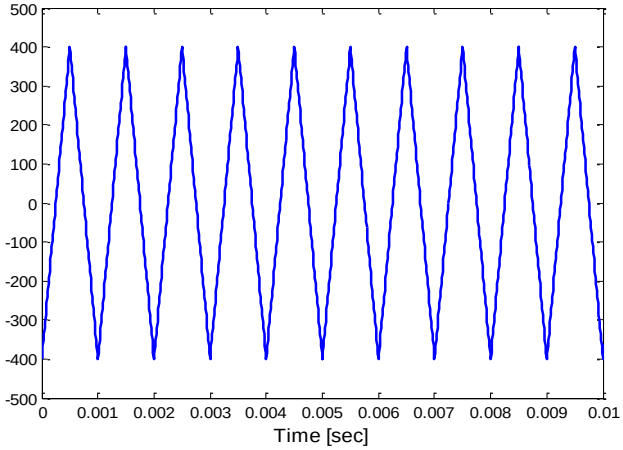

شکل۴-۱۳: شماتیک کلی اینورتر

بنابراین V2Gها به صورت یک باتری مدلسازی شده‌اند که توسط اینورتر می‌توانند با شبکه تبادل توان داشته باشند. در واقع اینورتر انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری خودروها را از شبکه تامین می‌کند و نیز در مواقع لزوم انرژی ذخیره شده در باتری خودروها را به شبکه منتقل خواهد کرد. در این مدل، کنترل تبادل توان بین V2G و شبکه، با تغییر در سطح ولتاژ خروجی اینورتر نسبت به ولتاژ شبکه میسر می‌باشد. به منظور کنترل سطح ولتاژ خروجی اینورتر، از یک مدار کنترل برای تولید پالس‌های سوئیچ‌های اینورتر استفاده می‌شود. در این مدار ابتدا یک موج دندانه اره‌ای توسط بلوک دیاگرام زیر تولید می‌شود.




شکل۴-۱۴: بلوک دیاگرام تولید موج دندانه اره‌ای

دامنه این موج با توجه به ساختار اینورتر و سطح ولتاژ باتری DC برابر ۴۰۰ ولت مطابق شکل زیر انتخاب شده است. فرکانس این موج نیز در واقع همان فرکانس سوئیچینگ اینورتر است که باید حداقل ۲۰ برابر فرکانس ولتاژ خروجی باشد.

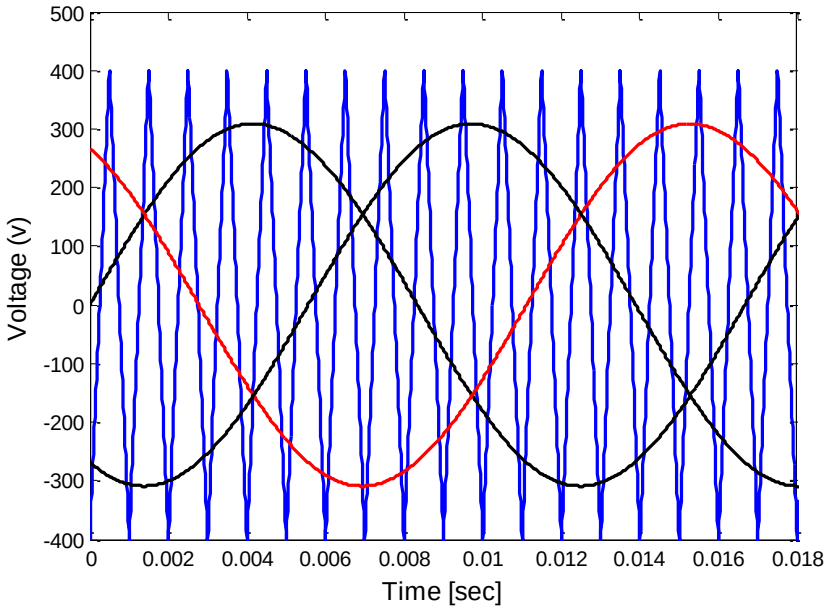



شکل۴-۱۵: موج‌های دندانه اره‌ای

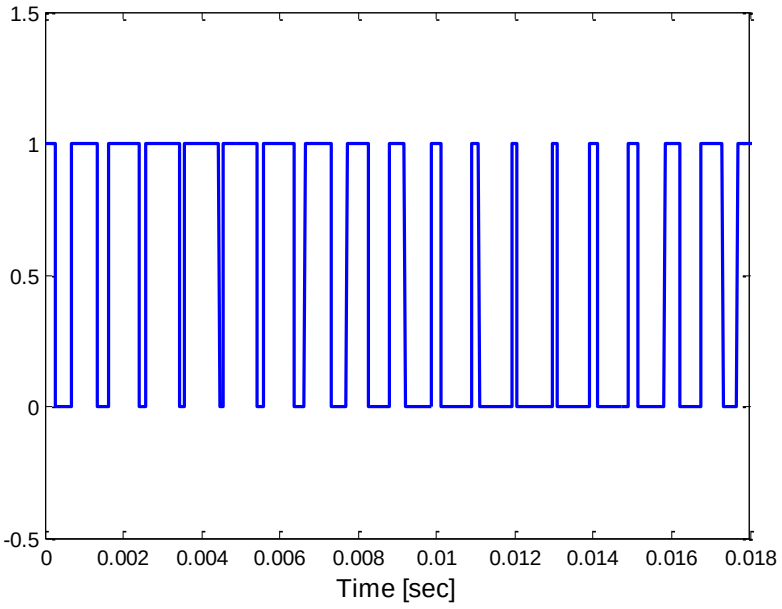
موج دندانه اره‌ای تولید شده با موج مرجع هر فاز با دامنه ۳۱۱ ولت مطابق شکل۴-۱۶ مقایسه می شود. با مقایسه این سیگنال‌ها، پالس‌های مناسب برای سوئیچ‌های اینورتر تولید می‌شوند. این عملیات در یک بلوک مجزا و توسط کد زیر انجام می‌شود.

```
saw=u(1);
Van=u(2);
Vbn=u(3);
Vcn=u(4);
for i=1:3
    sys(i)=0;
    sys(i+3)=1;
end

if saw<Van
    sys(1)=1;
    sys(4)=0;
end

if saw<Vbn
    sys(2)=1;
    sys(5)=0;
end

if saw<Vcn
    sys(3)=1;
    sys(6)=0;
end
```

که در آن u(1)، u(2)، u(3) و u(4) ورودی‌های تابع و sys(1)، sys(2)، ... و sys(6) خروجی‌های تابع می‌باشند. پالس تولید شده برای سوئیچ شماره یک نیز در شکل ۴-۱۷ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

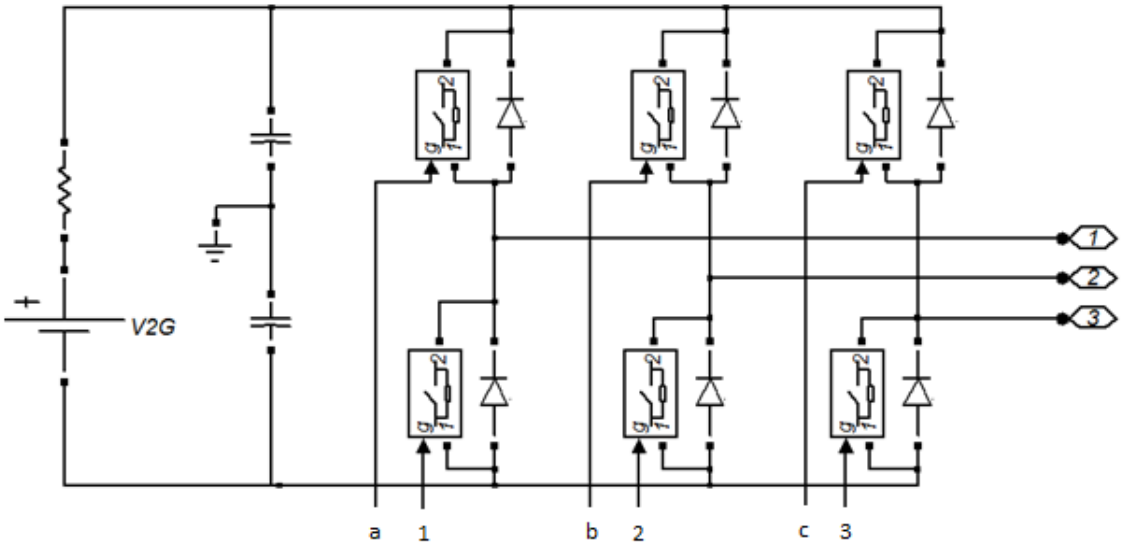



شکل۴-۱۶: موج دندانه‌اره‌ای و مراجع ولتاژ

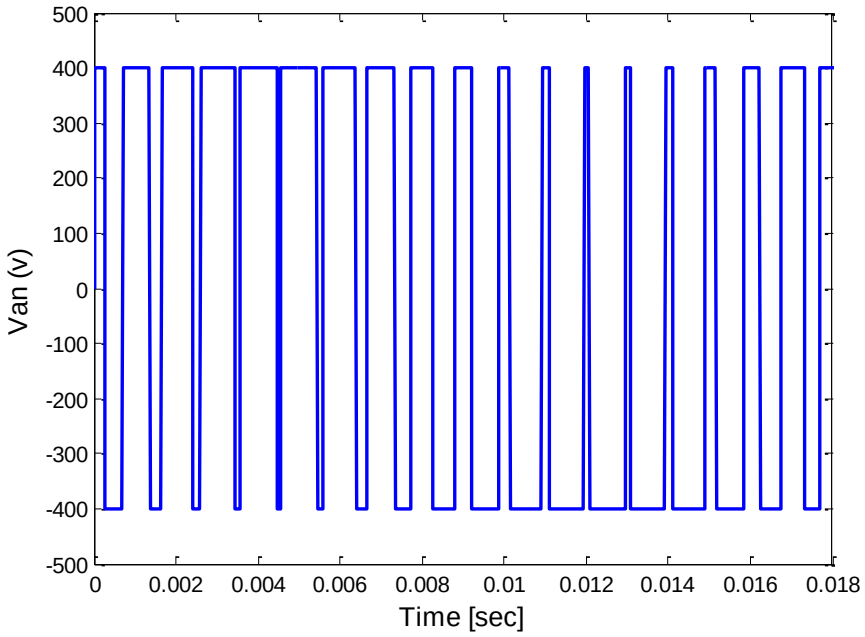



شکل۴-۱۷: پالس تولید شده برای سوئیچ ۱

با اعمال این کدها به ۶ سوئیچ موجود در مدار قدرت اینورتر، ولتاژ سه فاز مورد انتظار در خروجی تولید خواهد شد. این سوئیچ‌ها مطابق شکل زیر بین باتری DC و شبکه سه فاز قرار گرفته اند. در این حالت ولتاژ فاز a نسبت به نقطه نول تعریف شده در مدار اینورتر، مطابق شکل ۴-۱۹ خواهد بود.

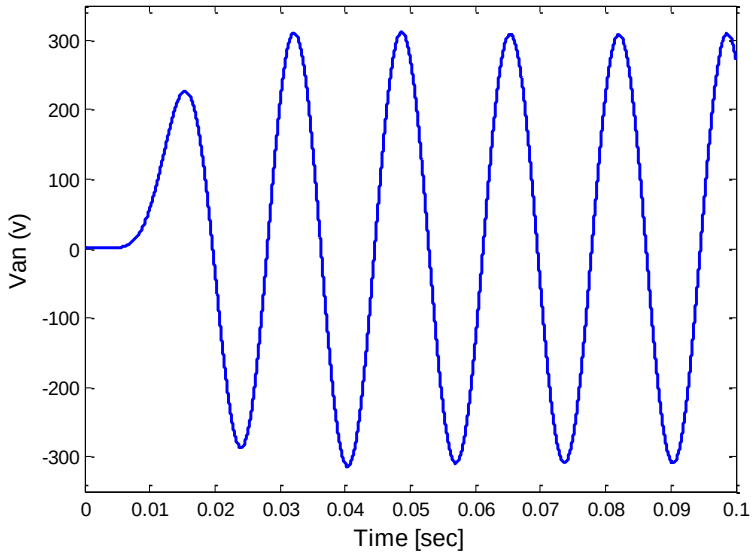



شکل۴-۱۸: مدار قدرت اینورتر



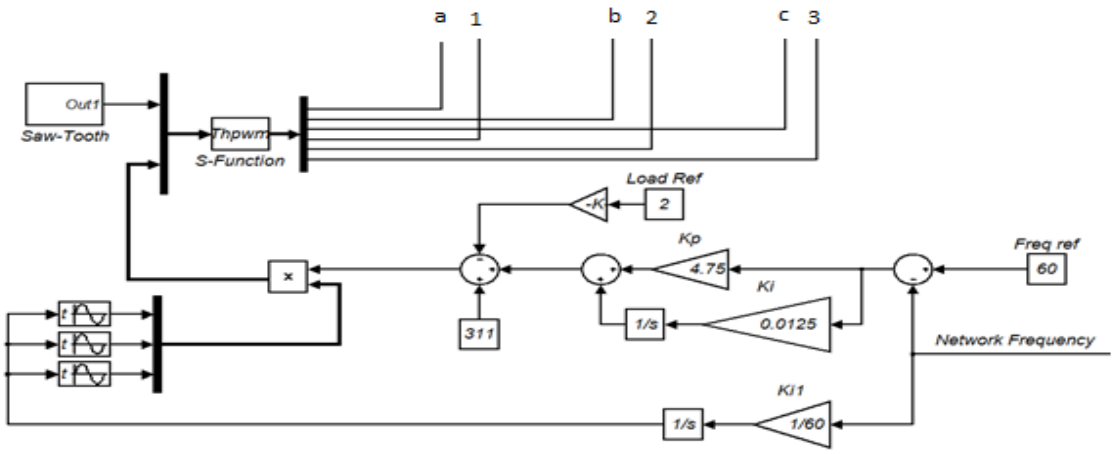

شکل۴-۱۹: ولتاژ فاز a (Van)

این ولتاژ دارای محتوای هارمونیکی قابل توجهی می‌باشد اما هارمونیک اول آن، یک موج سینوسی هم فرکانس و هم دامنه با موج مرجع ورودی است که توسط یک فیلتر پایین گذر قابل مشاهده خواهد بود. شکل زیر هارمونیک اول ولتاژ فاز a را نشان می‌دهد.




شکل۴-۲۰: هارمونیک اول ولتاژ Van

اگر انتقال توان بین V2G و شبکه انجام نشود، دامنه ولتاژ خروجی اینورتر برابر با ولتاژ شبکه خواهد بود. اما برای کنترل تبادل توان بین V2G و شبکه، نیازمند تغییر در دامنه ولتاژ خروجی اینورتر می‌باشیم. در این مورد از یک مدار کنترلی مطابق شکل زیر برای کنترل دامنه ولتاژ مرجع و در نتیجه کنترل دامنه ولتاژ خروجی اینورتر استفاده شده است.




شکل۴-۲۱: مدار کنترلی اینورتر

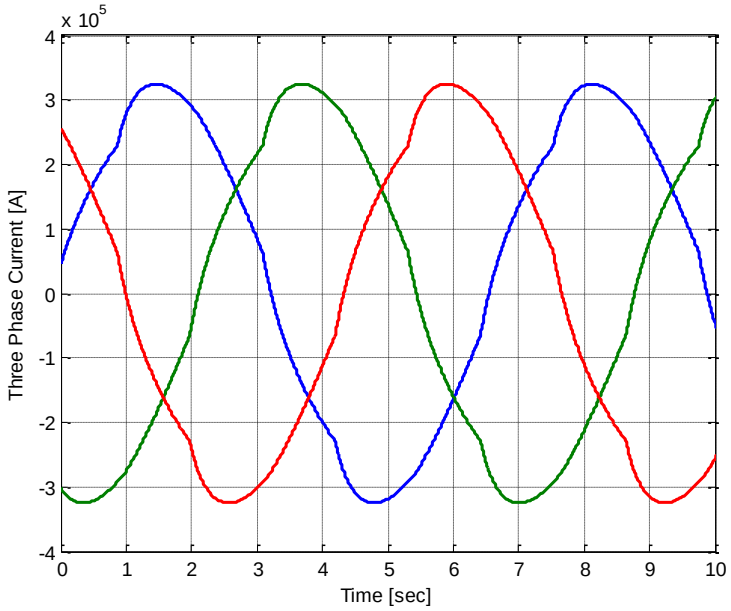
در این مورد خاص فرض می‌شود خودروهای برقی برای شارژ باتری‌های خود در حدود ۲ مگاوات به صورت ثابت از شبکه توان دریافت می‌کنند. برای کنترل این مقدار توان انتقالی، از یک سیگنال خطا در ضریب دامنه موج مرجع ولتاژ استفاده می‌شود. اندازه این سیگنال توسط ضریب مناسبی از مرجع بار ثابت V2Gها تعیین می‌شود.

علاوه بر این، سیگنال دیگری که توسط یک کنترل‌کننده PI و سیگنال خطای فرکانس شبکه تولید شده است نیز در ضریب دامنه موج مرجع ولتاژ موثر خواهد بود. اندازه این سیگنال در حالت تعادل و پایدار صفر است اما به دنبال بروز اغتشاش در شبکه، فرکانس سیستم دچار نوسان شده و سیگنال خطای فرکانس با ایجاد تغییرات مناسب در دامنه موج مرجع ولتاژ، اقدام به کنترل توان انتقالی بین V2G و شبکه و در نتیجه کمک به میرایی نوسانات فرکانس شبکه می‌نماید.

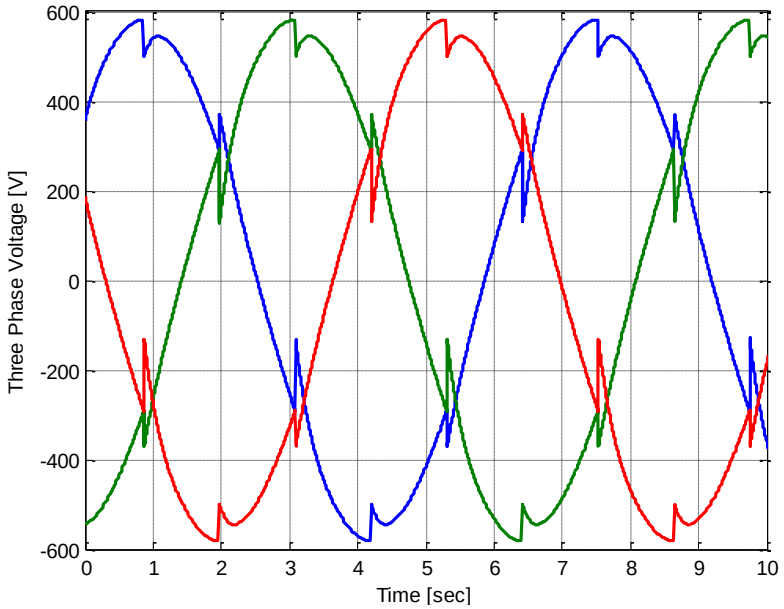
از سوی دیگر، حفظ سنکرونیزم اینورتر با شبکه بویژه در هنگام بروز نوسانات فرکانس شبکه، از ملزومات عملکرد صحیح این سیستم می‌باشد. بدین منظور موج مرجع ولتاژ توسط یک سیگنال زمانی کنترل شده تولید می‌شود که با انگرالگیری از فرکانس لحظه‌ای شبکه بدست آمده است. چگونگی محاسبه و عملکرد این سیگنال نیز در شکل ۴-۲۱ مشخص می‌باشد.

-پس از شبیه‌سازی سیستم در وضعیت نرمال و اطمینان از صحت جواب‌های مدل، عملکرد و تاثیر V2G بر کنترل فرکانس شبکه و دیگر پارامترهای المان‌های شبکه قدرت، با شبیه‌سازی دو سناریوی اغتشاش، بررسی می‌شود.

لازم به ذکر است که تعداد قابل توجه خودروهای برقی در شبکه شبیه‌سازی شده باعث خواهد شد تا مدارات واسطه این V2Gها بر کیفیت توان شبکه نیز تاثیرگذار باشد. در شکل‌های زیر نمونه‌ای از این تاثیر در ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور نشان داده شده است.




شکل۴-۲۲: تغییرات جریان ترمینال ژنراتور در اثر پدیده کیفیت توان در حضور V2Gها



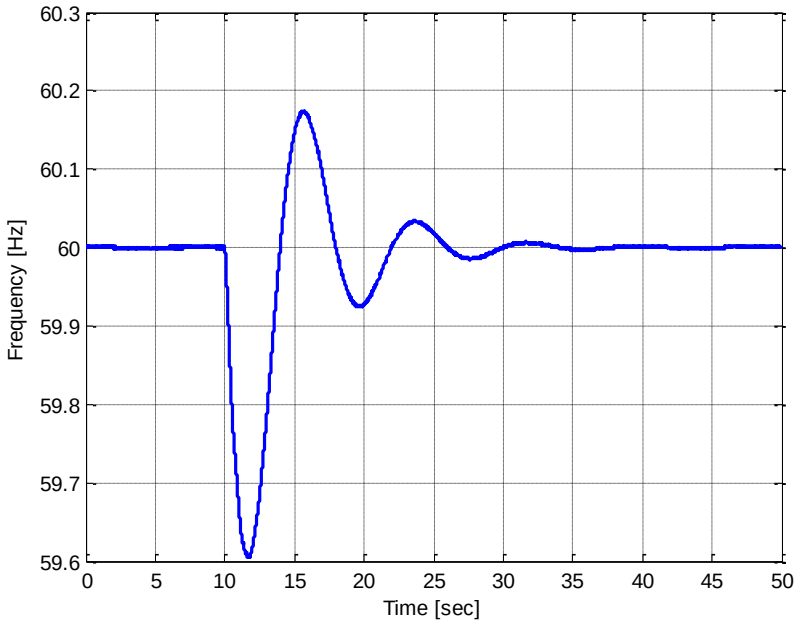

شکل۴-۲۳: تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور در اثر پدیده کیفیت توان در حضور V2Gها

با توجه به این موضوع، تاثیر منفی اتصال تعداد زیادی از خودروهای برقی به شبکه قدرت بر کیفیت توان شبکه نیز می‌تواند از معایب خودروهای برقی به حساب آمده و بررسی آن می‌تواند در جایگاه خود حائز اهمیت باشد. در اینجا از مطالعه این مساله صرفنظر شده و تاثیر خودروهای برقی بر کنترل فرکانس شبکه مورد توجه قرار گرفته است.

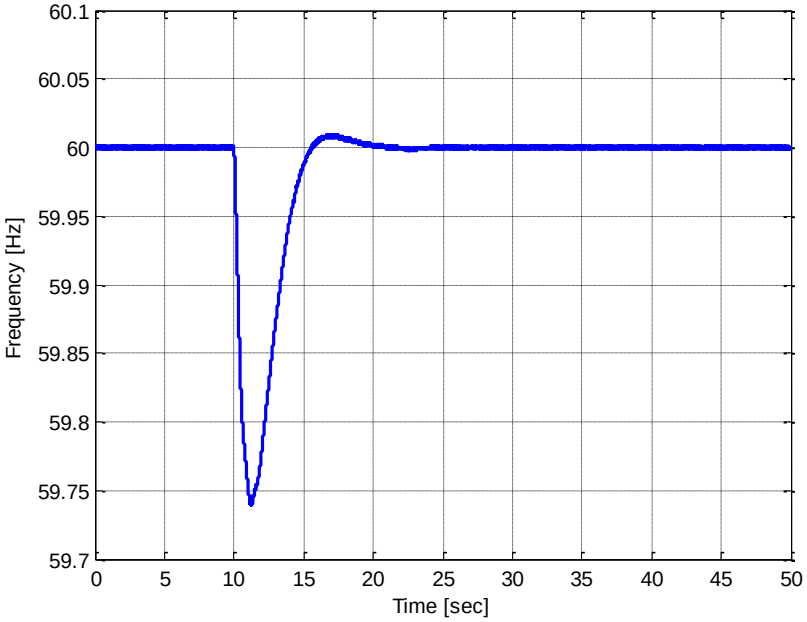
### ٤-٣-٧. سناریوی اول- اتصال ناگهانی بار

در سناریوی اول، دو حالت مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه و یا عدم مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر در هر دو حالت V2Gها در سیستم وجود دارند و به شبکه متصل می‌باشند اما در حالت اول در حال شارژ خودروهای خود و یا رسیدگی به سایر امور هستند و در کنترل فرکانس شبکه شرکت نمی‌کنند. در صورتی که در حالت دوم V2Gها از همان ابتدا که در شبکه متصل می‌باشند در کنترل فرکانس شبکه شرکت کرده و تاثیر آنها در ادامه نشان داده شده است. بدیهی است مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه بر دیگر پارامترهای المان‌های موجود در شبکه تاثیر خواهد گذاشت. از سوی دیگر در حالت عدم مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه به هنگام نوسانات فرکانس، برخی پارامترهای V2G نیز از اغتشاش به وجود آمده تاثیر می‌پذیرند.

در این سناریو ابتدا خط انتقال بین باس ۲ و باس ۳ قطع می‌باشد. سیستم در حالت دائمی قرار داشته و با بار $۱۰۰^{MW}$ در باس ۲ و فرکانس نامی $۶۰^{Hz}$ در حال کار است. پس از طی شدن حالات گذرای اولیه سیستم و در لحظه $t_1 = 10^{sec}$ خط رابط باس‌های ۲ و ۳ وصل شده و بار $۳۰^{MW}$ توسط باس ۳ در مدار قرار می‌گیرد. اتصال این بار به شبکه ایزوله باعث افزایش بار شبکه و کاهش فرکانس آن خواهد شد. در این حالت نوسانات فرکانس تنها توسط گاورنر و سیستم AGC ژنراتور کنترل می‌شود. در شکل ۴-۲۴ تغییرات فرکانس شبکه در طی فرآیند فوق نشان داده شده است. سپس در همین سناریو، نوسانات فرکانس در حالت مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه بررسی می‌شود که در آن V2G مانند حالت قبل از ابتدا در شبکه وجود داشته اما در این قسمت در هنگام افزایش بار شبکه و کاهش فرکانس، اقدام به تزریق توان اکتیو به شبکه و کنترل فرکانس خواهد نمود. در این حالت می‌توان V2Gها را به عنوان منابع تولید پراکنده با سرعت پاسخگویی بالا در نظر گرفت. تغذیه شبکه توسط این منابع به هنگام افزایش بار شبکه، باعث کاهش دامنه نوسانات فرکانس و میرایی سریع‌تر آن خواهد شد. در شکل زیر نوسانات فرکانس شبکه طی حالت فوق نشان داده شده است.



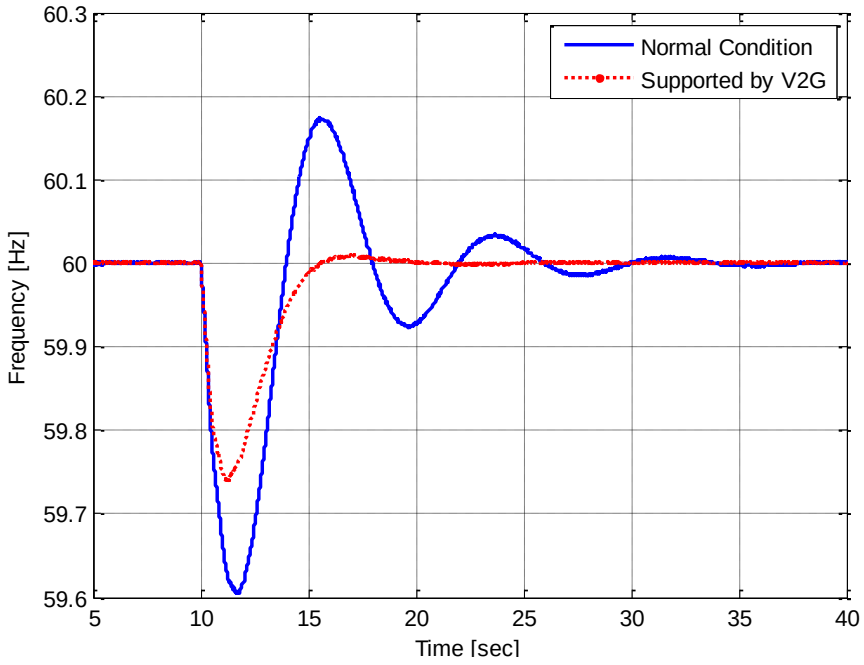

شکل۴-۲۴: نوسانات فرکانس شبکه هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس




شکل۴-۲۵: نوسانات فرکانس شبکه هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس

این شکل، تاثیر قابل توجه V2G در کنترل و تثبیت فرکانس شبکه را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، در شکل ۴-۲۶ نوسانات فرکانس در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه نشان داده شده است. بدیهی است با افزایش ناگهانی بار، شبکه قدرت در ابتدا شاهد افت فرکانس نسبتا شدید خواهد بود. همانطور که از شکل ۴-۲۴ پیداست، فرکانس شبکه تقریبا تا ۲۵ ثانیه پس از وقوع اغتشاش با نوسانات زیادی میرا می‌شود که مسلما به ضرر شبکه خواهد شد. در

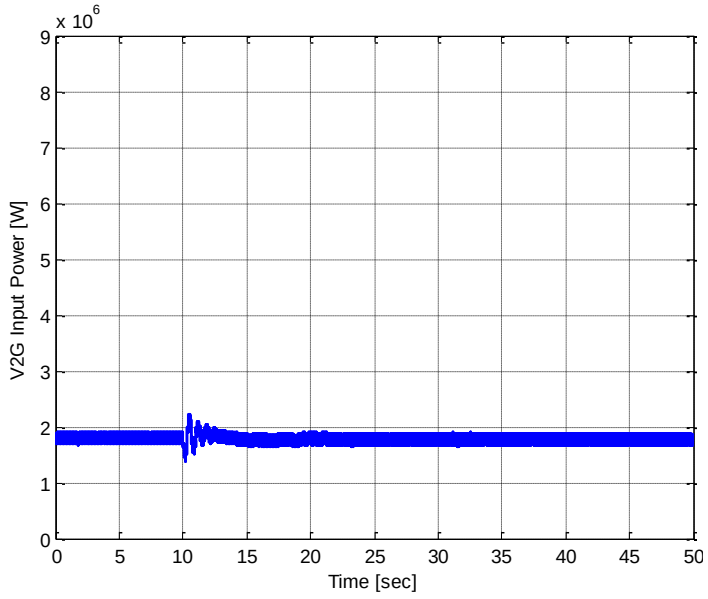
حالت دوم در شکل ۴-۲۵ با دخالت V2Gها در کنترل فرکانس، فرکانس شبکه خیلی سریع‌تر در حدود ۱۰ ثانیه پس از افزایش ناگهانی بار، با نوسانات کمتری میرا خواهد شد. وضوح تاثیر مشارکت V2G در کنترل فرکانس در شکل ۴-۲۶ قابل مشاهده می‌باشد. دو عامل میرایی سریع‌تر و نوسانات کمتر در فرکانس از ویژگی‌های بارز مشارکت V2Gها می‌باشند.



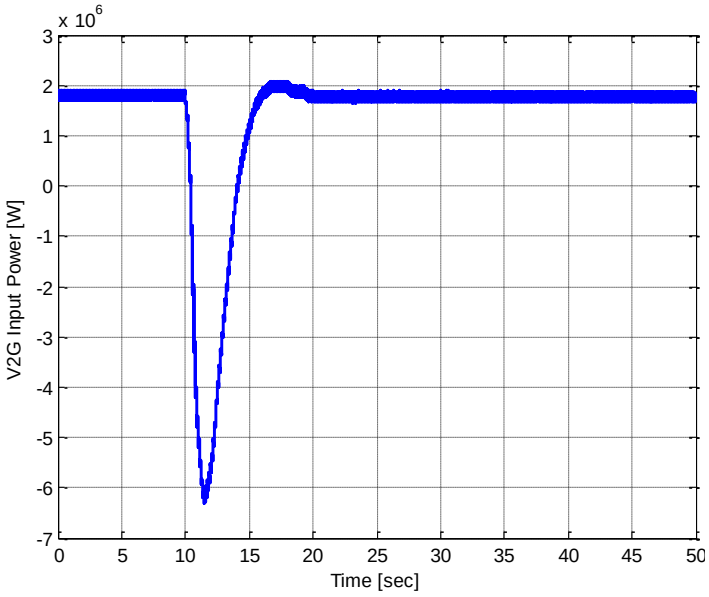

شکل۴-۲۶: مقایسه نوسانات فرکانس شبکه هنگام افزایش بار در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2G

علاوه بر این، مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه بر دیگر المان‌های سیستم نیز تاثیرگذار است. همانگونه که قبلا بیان شد، مجموعه خودروهای برقی در شبکه مورد نظر، دارای قابلیت تبادل توان حداکثر $۲۰^{MW}$ می‌باشند. هنگام اتصال بار ۳۰ مگاواتی، V2Gها به عنوان یکی از منابع کنترل کننده فرکانس، به شبکه توان تزریق می‌کنند. در نتیجه بخشی از بار شبکه توسط V2Gها جبران می‌شود و این خود باعث می‌گردد تا توان خروجی کمتری از سایر المان‌های شرکت‌کننده در کنترل فرکانس، به شبکه تزریق شود. همانطور که از شکل ۴-۲۷ پیداست هنگامی‌که V2Gها در کنترل فرکانس شبکه مشارکت نمی کنند، به دلیل شارژ بعضی از باتری‌های خود در حدود $۲^{MW}$ از شبکه توان می‌کشند. اما در هنگام بروز اغتشاش در زمان ۱۰ ثانیه، توان V2Gها با توجه به تاثیرپذیری از اغتشاشات موجود، دچار نوسان نسبتا کوچکی خواهد شد. با توجه به اینکه ظرفیت کل V2Gهای در

دسترس برابر $^{MW}$۲۰ می‌باشد، حداکثر توان انتقالی بین V2G و شبکه نمی‌تواند بیشتر از این مقدار باشد. لذا نوسانات توان V2G در هنگام بروز اغتشاش در مقدار $^{MW}$۲۰ به اشباع می‌رسد. البته در سناریوی فوق با توجه به دامنه اغتشاش، نوسانات توان V2Gها از $^{MW}$۶ تجاوز نکرده است.

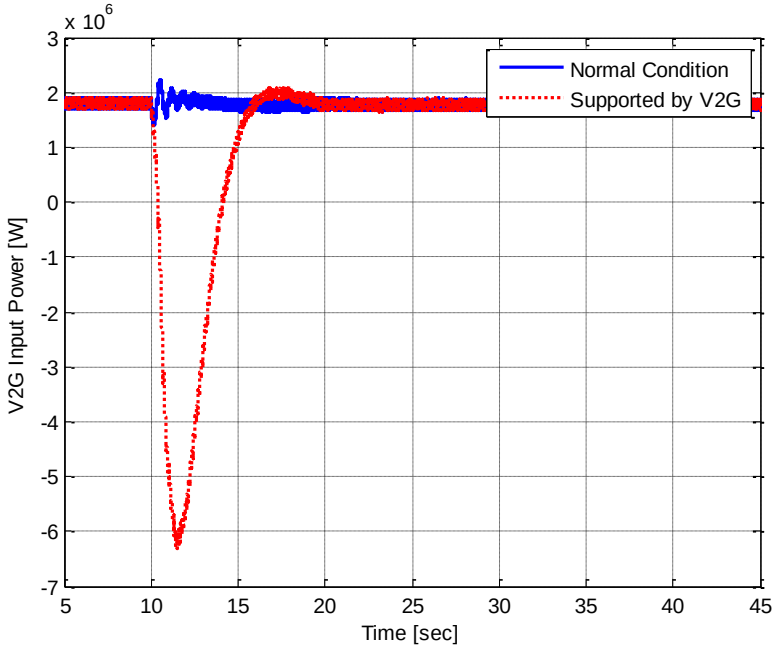



شکل۴-۲۷: توان ورودی به V2G هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس



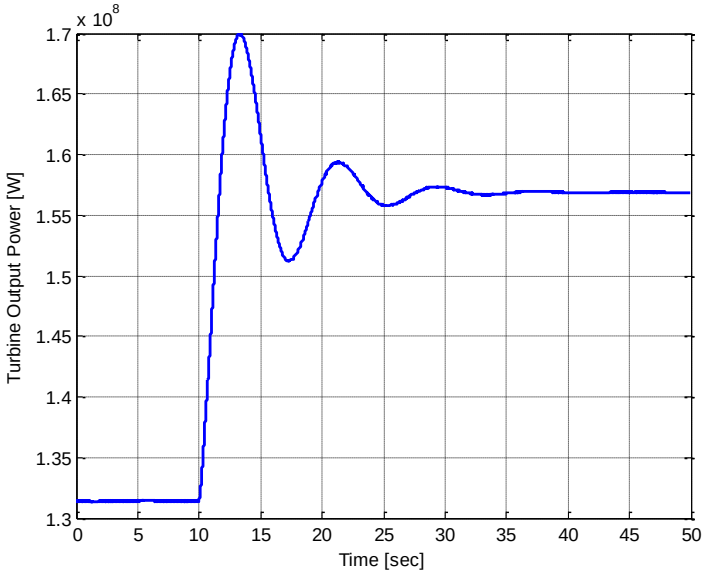

شکل۴-۲۸: توان ورودی به V2Gهنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس

مقایسه توان ورودی به V2G در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2G در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است.

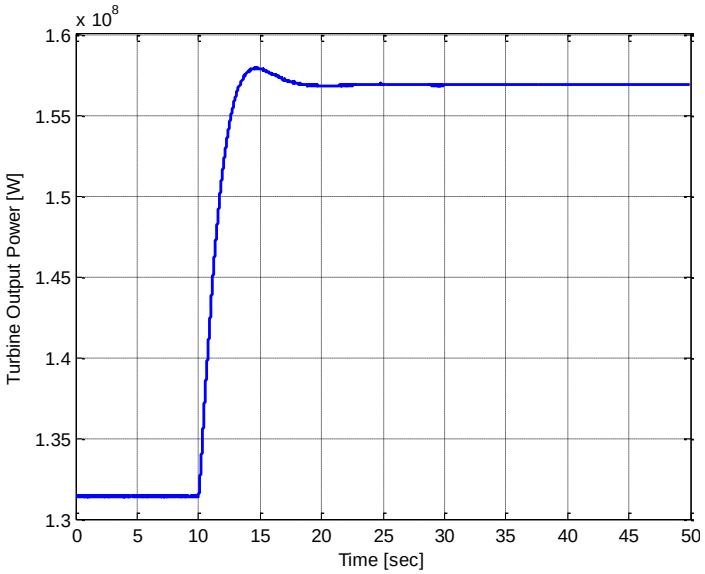



شکل۴-۲۹: تاثیر مشارکت V2G در توان ورودی به V2G هنگام اتصال ناگهانی بار

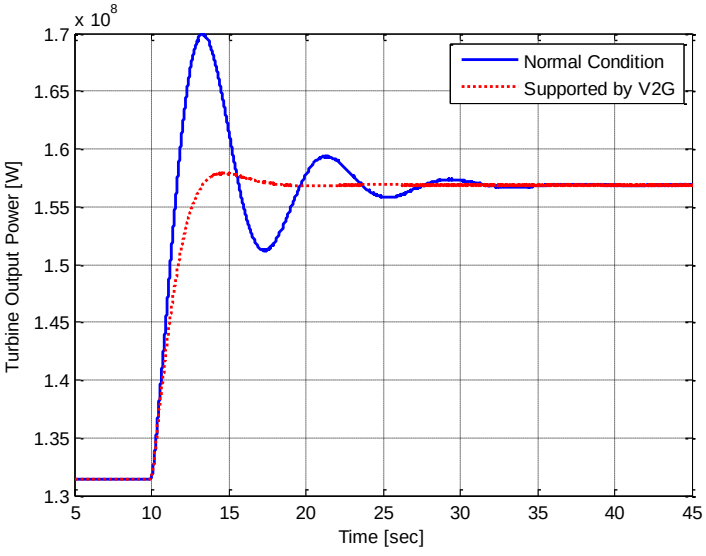
این موضوع با توجه به تغییرات توان خروجی توربین معادل شبکه هنگام افزایش بار شبکه، بررسی می‌شود. در شکل ۴-۳۰ تغییرات توان خروجی توربین به هنگام اتصال بار ۳۰ مگاواتی به شبکه در حالت عدم مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه نشان داده شده است. تغییرات توان خروجی توربین هنگام افزایش ناگهانی بار در شکل ۴-۳۱ در حالت مشارکت V2Gها در کنترل فرکانس شبکه نسبتا کمتر می‌باشد. از این رو قابلیت سایر المان‌های شرکت کننده در کنترل فرکانس شبکه، برای کنترل اغتشاشات بزرگتر افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است بزرگتر بودن توان خروجی توربین از بار شبکه، با توجه به تلفات شبکه، منطقی به نظر می‌رسد. همانگونه که شکل‌های ۴-۳۰ و ۴-۳۱ نشان می‌دهند، توان خروجی از توربین به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. این امر با توجه به سرعت پاسخ نسبتا بالای V2Gها میسر شده است. در واقع V2Gها می‌توانند در کسری از ثانیه وارد مدار شده و مقدار مورد نیاز توان را به شبکه تزریق نمایند. این تاثیر به صورت واضح‌تر در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است.




شکل۴-۳۰: تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس




شکل۴-۳۱: تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس



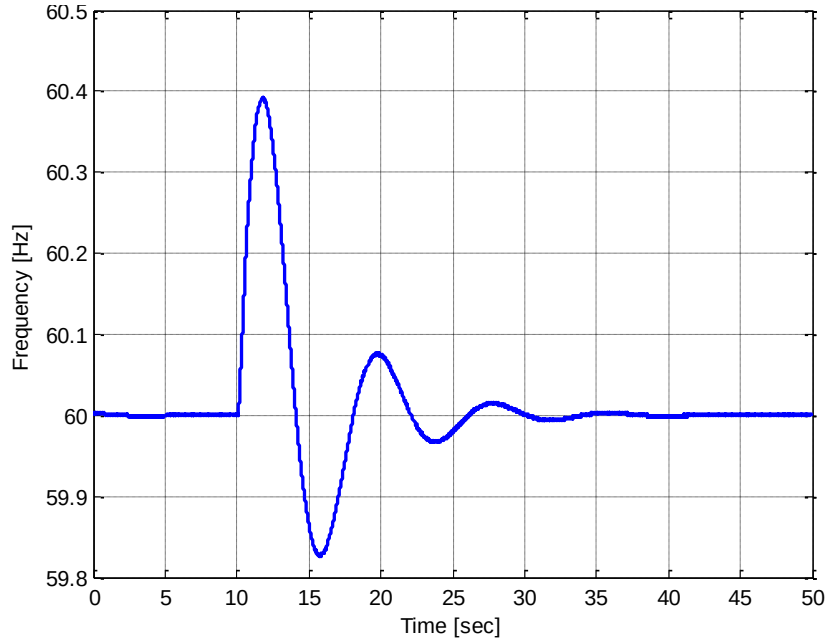

شکل۴-۳۲: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان خروجی توربین هنگام اتصال ناگهانی بار

در سناریوی بررسی شده، عملکرد V2Gها به عنوان یک منبع تولید پراکنده در کنترل فرکانس شبکه به هنگام اتصال یک بار بزرگ به شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سرعت پاسخ نسبتا بالای V2Gها از مهم‌ترین امتیازات آن در کنترل فرکانس شبکه می‌باشد.

### ٤-٣-٨. سناریوی دوم- قطع ناگهانی بار از شبکه قدرت

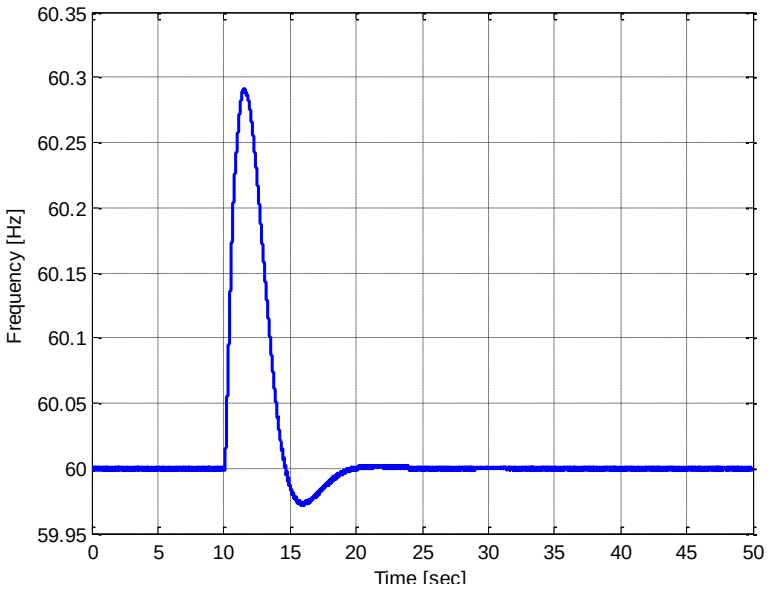
از دیگر قابلیت‌های V2G برای کنترل فرکانس شبکه، عملکرد آن به عنوان یک بار بزرگ هنگام قطع بار و افزایش فرکانس شبکه می‌باشد. این موضوع طی یک سناریوی اغتشاش متفاوت در همان شبکه قبلی بررسی شده است. در این سناریو نیز دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در این سناریو، شبکه در حالت پایدار با بار $۱۰۰^{MW}$ در باس ۲ و $۳۰^{MW}$ در باس ۳ در حال کار است. در لحظه $t=10^{sec}$ بار ۳۰ مگاواتی باس ۳ به دنبال خطا در خط انتقال بین باس ۲ و ۳ از شبکه جدا می‌شود. بدیهی است این رخداد باعث کاهش بار شبکه و افزایش فرکانس خواهد شد. در این هنگام کنترل‌کننده‌های شبکه وارد عمل شده و با کاهش توان خروجی توربین اقدام به میرایی نوسانات فرکانس خواهند نمود. تغییرات فرکانس شبکه طی فرآیند فوق در شکل زیر نشان داده شده است.

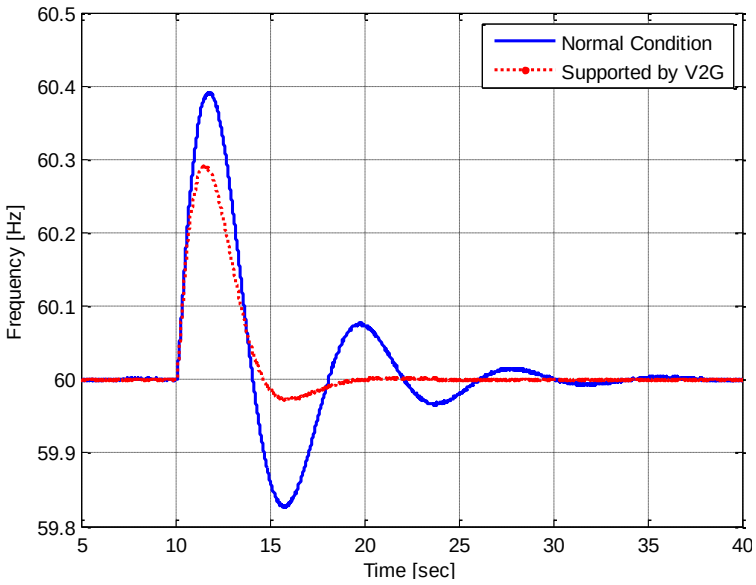



شکل ۴-۳۳: نوسانات فرکانس شبکه هنگام قطع ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس

مشارکت V2Gها هنگام بروز نوسانات فوق می‌تواند در کاهش دامنه نوسانات و میرایی سریع‌تر آن موثر باشد. در این حالت V2G به عنوان یک بار وارد سیستم شده و با شارژ باتری خودروهای خود اقدام به کنترل فرکانس می‌نماید. در شکل ۴-۳۴ نوسانات فرکانس شبکه هنگام قطع بار در حالت مشارکت V2Gها نشان داده شده است. مقایسه این نوسانات در دو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2Gها در شکل ۴-۳۵، بیانگر تاثیر خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه هنگام قطع بار می‌باشد.

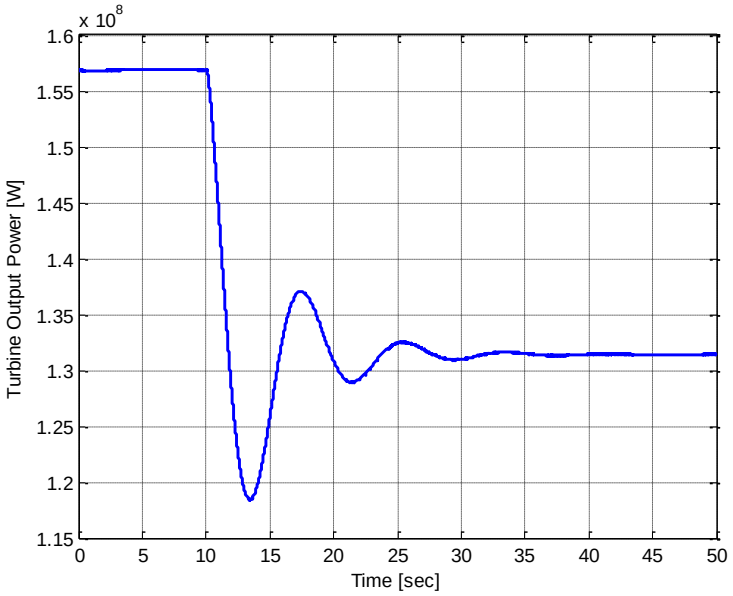



شکل ۴-۳۴: نوسانات فرکانس شبکه هنگام قطع ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس

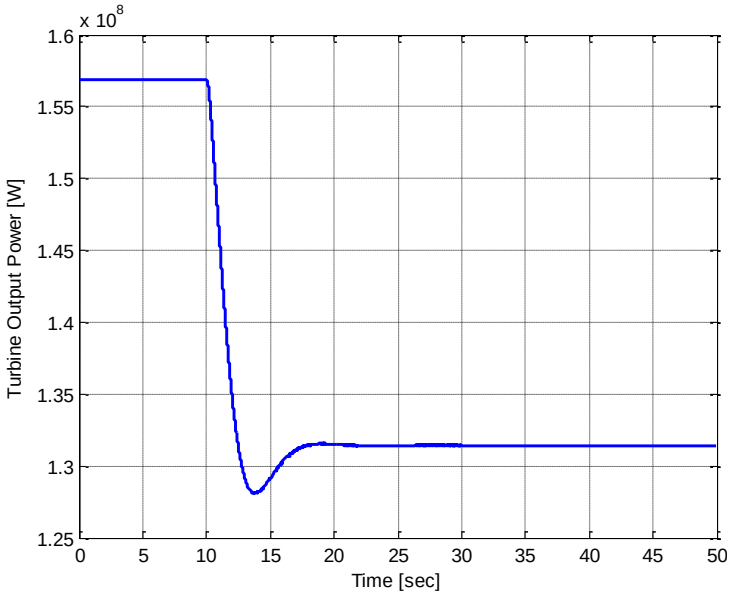



شکل۴-۳۵: مقایسه نوسانات فرکانس شبکه هنگام افزایش بار دردو حالت مشارکت و یا عدم مشارکت V2G

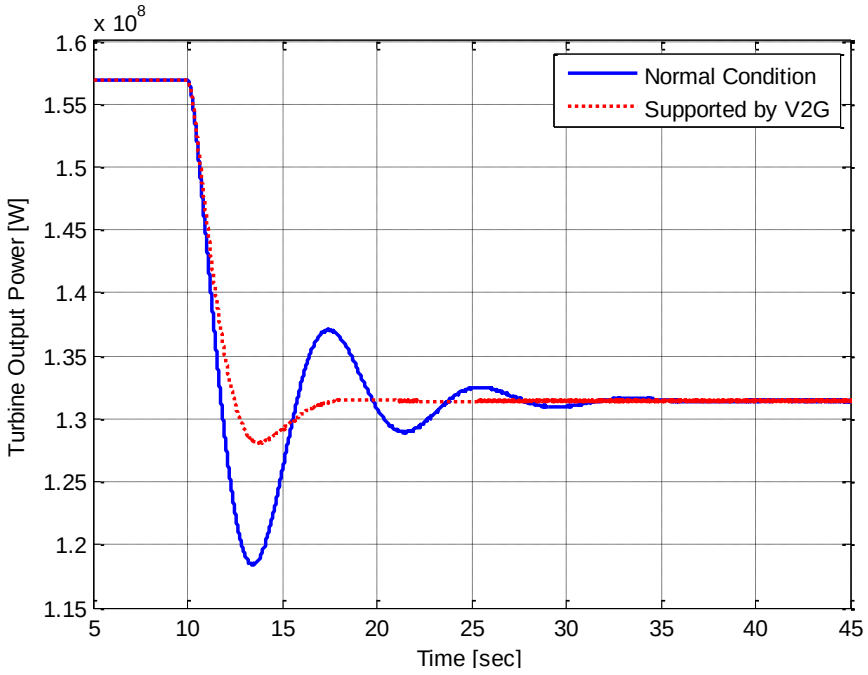
همانگونه که قبلا بیان شد، مشارکت V2G بر سایر کمیت‌های سیستم مانند توان خروجی توربین معادل شبکه نیز تاثیرگذار است. در شکل‌های زیر تغییرات توان خروجی توربین به ترتیب در حالت عدم دخالت V2Gها و در حضور مشارکت آنها نشان داده شده است. بررسی این شکل‌ها، کاهش کمتر در توان خروجی توربین به هنگام مشارکت V2G را نشان می‌دهد. این کاهش به طور واضح در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است.




شکل۴-۳۶: تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار در حالت عدم مشارکت V2G در کنترل فرکانس

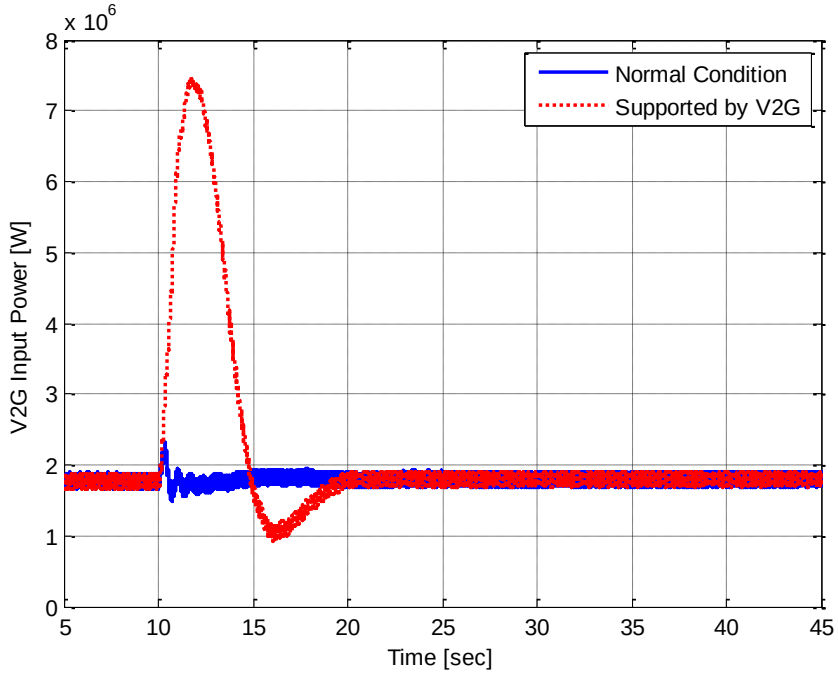



شکل۴-۳۷: تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار در حالت مشارکت V2G در کنترل فرکانس




شکل۴-۳۸: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان خروجی توربین هنگام قطع ناگهانی بار

بدیهی است به هنگام قطع بار، V2G به عنوان یک بار وارد سیستم شده و با دریافت توان از شبکه به میرایی نوسانات فرکانس کمک خواهد نمود. تغییرات توان ورودی به V2G در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است.




شکل۴-۳۹: تاثیر مشارکت V2G در تغییرات توان ورودی به V2G هنگام قطع ناگهانی بار

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که در زمان مشارکت V2G، نوسانات فرکانس شبکه در بازه زمانی کوتاهتر و با درصد فراجهش کمتر میرا می‌شوند. این مساله به طور عمده ناشی از سرعت پاسخ بسیار سریع V2Gها نسبت به سایر نیروگاه‌های معمول شبکه می‌باشد. بررسی انجام شده در شبکه نمونه نشان می‌دهد چنانچه درصد بالایی از خودروهای درونسوز فعلی با خودروهای برقی جایگزین شده و الگوی استفاده از خودروها کماکان بدون تغییر بماند، انرژی کل این خودروها برای مشارکت در کنترل فرکانس شبکه، قابل توجه خواهد بود. به علاوه سرعت پاسخ بسیار بالای این خودروها قابلیت‌های ویژه آنها را در کنترل فرکانس شبکه نشان می‌دهد.

## ۴-۴. مشکلات تجمیع خودروهای برقی و راهکارها

تنظیم فرکانس یک شبکه قدرت نیازمند نیروگاه‌هایی با پاسخ دینامیکی سریع و ظرفیت قابل توجه می‌باشد اما ظرفیت باتری یک V2G برای این مساله بسیار ناچیز است. چنین ظرفیت محدودی در مقایسه با مقیاس شبکه بسیار ناچیز خواهد بود و مانند بررسی اثر یک نویز کوچک در شبکه بزرگ می‌باشد و کار دشواری به نظر می‌رسد. بنابراین نیاز به جمع کردن خودروها در قالب یک پارکینگ[1] در شبکه قدرت احساس می‌شود.

با توجه به قابلیت V2G در کنترل فرکانس شبکه مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که V2Gها توانایی کنترل فرکانس شبکه‌های بهم پیوسته بزرگتر را نیز دارند. عمل کنترل فرکانس مستلزم شارژ یا دشارژ سریع باتری‌ها می‌باشد. به عنوان یک مطالعه موردی، شبکه PJM در نظر گرفته شده است. در این شبکه عمل تنظیم فرکانس ممکن است صدها بار در روز صورت گیرد و مدت زمان پاسخ‌گویی برای تنظیم نباید بیشتر از ۵ دقیقه طول بکشد [۳۸]. لذا این عمل شارژ و دشارژ باتری‌ها نیاز به بررسی و برنامه‌ریزی دقیق دارد تا برای شبکه مشکل جدید پیش نیاید. در غیر این صورت ممکن است عمل شارژ باتری خودروها همزمان با ساعات پیک شبکه رخ دهد که مشکل حادتری را به وجود

[1] Parking-lot

خواهد آورد. لذا خودروها نیاز به کنترل و مدیریت دارند تا بتوانند به صورت هماهنگ عمل کنند. در نتیجه V2Gها باید جمع شوند و در قالب یک منبع تولید یا بار قابل کنترل عمل نمایند. مدیریت V2Gها به دو طریق امکان‌پذیر است. در حالت اول ISO می‌تواند عهده‌دار این مدیریت شود. بنابراین باید روی تک تک خودروها نظارت داشته باشد. اما از آنجا که خودروها از نقاط مختلف به شبکه متصل می‌شوند، کار دشواری به نظر می‌رسد. امروزه شبکه‌های قدرت به سمت خصوصی شدن پیش می‌روند. لذا منطقی به نظر می‌رسد که این مدیریت به یک نهاد واحد سپرده شود.

همانگونه که قبلا نیز بیان شد کنترل فرکانس یکی از مهمترین خدمات جانبی می‌باشد. در شبکه‌های قدرت سنتی تامین سرویس‌های خدمات جانبی برعهده ISO بوده در حالیکه با تجدید ساختار سیستم‌های قدرت شرکت‌های خصوصی جایگزین شرکت‌های عمومی شدند. لذا مسئولیت تامین این سرویس‌ها به یک نهاد مرکزی واگذار می‌شود که در فصل‌های بعدی به طور مفصل بیان خواهد شد.

## فصل پنجم

# مشارکت V2G

# در بازار ذخیره چرخان

# به منظور کنترل فرکانس شبکه

به طور کلی مدت زمانی که خودروهای برقی در پارکینگ قرار دارند نسبتا بیشتر از زمان در حال حرکت آنهاست. خودروی برقی در مدت حضور در پارکینگ به شبکه قدرت متصل بوده و قابلیت شارژ یا دشارژ دارد. همانگونه که در فصل‌های قبلی هم ذکر شد از این قابلیت می‌توان جهت پشتیبانی شبکه و تامین سرویس‌های جانبی مانند کنترل فرکانس استفاده کرد. تامین ذخیره چرخان[1] شبکه نیز از دیگر سرویس‌های جانبی است که نیازمند منبعی با توان رزرو آماده به کار می‌باشد. منبع تامین ذخیره چرخان باید بتواند در کمتر از چند دقیقه به حداکثر ظرفیت خروجی خود برسد. معمولا بخشی از ظرفیت ژنراتورهای در حال کار شبکه به عنوان منبع تامین ذخیره چرخان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر قابلیت ویژه خودروهای برقی متصل به شبکه باعث شده است تا مجموعه‌ای از این خودروها به عنوان یک منبع مناسب برای تامین ذخیره چرخان شبکه مطرح شوند. البته از آنجائیکه در شبکه‌های تجدید ساختار یافته، تامین ذخیره چرخان از طریق بازار جداگانه‌ای صورت می‌گیرد، مسائل اقتصادی نیز علاوه بر مسائل فنی در این موضوع بروز خواهد کرد. در این فصل به بررسی بازار ذخیره چرخان و موضوعات مختلف اقتصادی و فنی مرتبط با بکارگیری V2Gها در این بازار پرداخته شده است.

[1] Spinning Reserve

## ۵-۱. تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت

در شبکه‌های قدرت سنتی، تمامی نیروگاه‌ها تحت مالکیت بهره‌بردار مستقل شبکه یا شرکت‌های خاصی بوده و هزینه تولید، انتقال و توزیع برق را اینگونه شرکت‌ها متحمل می‌شدند. این شرکت‌ها عموماً دولتی بوده و دارای ساختار یکپارچه عمودی[1] بودند. در این ساختار تمام فرآیندهای تولید، انتقال و توزیع انرژی برق به صورت انحصاری در اختیار یک نهاد واحد قرار دارد. بدیهی است در این ساختار تمام هزینه‌های تولید، انتقال، توزیع و سایر هزینه‌های اضافی از مصرف‌کننده نهایی دریافت خواهد شد. از چندی پیش صنعت برق دچار تحولات اساسی از قبیل بازنگری در قوانین[2]، تجدید ساختار[3] و ... گردیده است. در این ساختار متخصصین شبکه‌های قدرت به این نتیجه رسیده‌اند که برای بهره‌برداری موثر از شبکه و کاهش هزینه تمام شده انرژی الکتریکی، بهتر است فرآیندهای مختلف تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی از حالت انحصاری خارج شده و در یک محیط رقابتی در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد. نظریات مختلف در این زمینه منجر به شکل‌گیری بازار برق شد. در این بازار انرژی الکتریکی به صورت یک کالا وارد می‌شود. ایجاد محیط رقابتی کاملا آزاد و غیر انحصاری در این بازار باعث می‌شود تا شرایط مساعدی برای بازیگران مختلف بازار بوجود آمده و هر یک از آنها بتوانند پیشنهادات خود را از طریق شبکه‌های ارتباطی به بازار برق اعلام نمایند.

بازار برق در حالت ایده‌ال کاملا رقابتی است اما این موضوع در مورد انرژی الکتریکی صدق نمی‌کند و دلایل مختلفی باعث می‌شود تا یک محیط ۱۰۰٪ رقابتی نداشته باشیم. از جمله این دلایل عدم امکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و ناتوانی در کنترل شارش توان به سمت دلخواه می‌باشد [۵۲]. برای حل این مشکل متقاضیان و تولیدکنندگان، پیشنهادات خود را از طریق اپراتور سیستم مطرح می‌کنند و یک ارگان نظارتی مسئولیت کنترل اضافه بار خطوط و خدمات پشتیبانی را برعهده می‌گیرد. در این

[1] Vertically Integrated
[2] Reregulation
[3] Restructuring

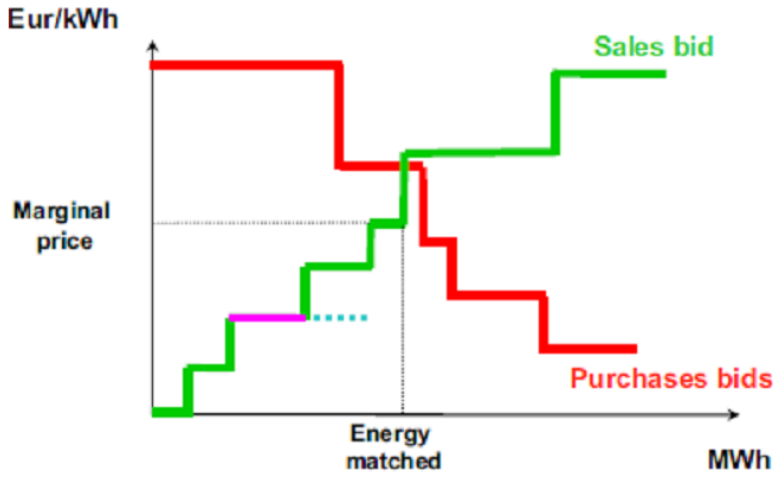
بازار همه مشتریان حق انتخاب و تعویض تامین کننده برق خود را در هر زمانی دارند. به همین دلیل تامین‌کنندگان با یکدیگر رقابت می‌کنند تا سرویس بهتری ارائه دهند و مشتریان بیشتری جذب کنند. این موضوع باعث می‌شود تا قیمت برق کاهش یابد [۵۳]. به طور کلی تجدید ساختار سیستم‌های سنتی باعث کاهش هزینه تمام شده برق می‌شود و این موضوع به نفع مشتریان می‌باشد.

در محیط تجدید ساختار یافته خدمات جانبی و انرژی به صورت کالاهای برق وارد بازار می‌شوند. ماهیت تولید و مصرف لحظه‌ای انرژی الکتریکی باعث می‌شود تا بازار معاملات این کالا متفاوت از بازارهای معمول باشد. انرژی الکتریکی در بازار برق از طریق چندین بازار جداگانه ارائه می‌شود که بعضی از این بازارها تا حدودی به یکدیگر وابسته می‌باشند. بازار انرژی مهم‌ترین بازار برق است که در آن مصرف‌کنندگان، انرژی مصرفی خود را از تولیدکنندگان خریداری می‌کنند. انتقال انرژی از تولیدکننده به مصرف‌کننده نیازمند یک شبکه انتقال پایدار است که برای حفظ پایداری، کنترل و امنیت این شبکه، بازارهای جانبی مختلفی تحت عنوان سرویس‌های خدمات جانبی راه‌اندازی شده است. این سرویس‌ها شامل کنترل فرکانس، تامین ذخیره چرخان، کنترل توان راکتیو و ... می‌باشند.

### ۵-۱-۱. بازار انرژی

همانگونه که قبلا نیز بیان شد به دلیل خواص ذاتی انرژی الکتریکی، امکان ایجاد یک بازار کاملا رقابتی وجود نخواهد داشت. یکی از روش‌های خرید و فروش در بازار برق ایجاد بورس برق می‌باشد. در محیط رقابتی قیمت برق با شفافیت بیشتری تعیین خواهد شد. در روش بورس برق تمام فروشندگان و خریداران موظفند پیشنهادات خرید و فروش خود را به بازار ارائه دهند. نهاد نظارتی بازار با تلاقی منحنی‌های تجمعی عرضه و تقاضا، نقطه تسویه بازار را تعیین می‌کند. در این قسمت پس از اینکه تولیدکنندگان و مصرف کنندگان میزان تولید و یا مصرف و قیمت مورد نظر خود را اعلام

نمودند، پرداخت به دو روش صورت می‌گیرد. در روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد[1] پرداخت به برنده بر مبنای پیشنهادی که کرده و برنده شده، صورت می‌گیرد. در روش پرداخت بر مبنای قیمت تسویه بازار (Market Clearing Price) یک قیمت در بازار تعیین می‌شود و تمام برندگان همین قیمت را دریافت می‌کنند. این پیشنهادات از کمترین به بیشترین قیمت مرتب شده و برق از واحدهای ارزانتر خریداری می‌شود تا جائیکه عرضه و تقاضا با یکدیگر برابر شوند. قیمت یکسانی که بابت هر کیلووات ساعت به فروشندگان پرداخت می‌شود قیمت آخرین پیشنهاد پذیرفته شده می‌باشد. بنابراین فروشندگانی که قیمت بالاتر و خریدارانی که قیمت پایین‌تری پیشنهاد داده‌اند، در این رقابت انتخاب نخواهند [۵۴]. در شکل زیر نمونه‌ای از قیمت تسویه بازار اروپا نشان داده شده است.




شکل۵-۱: قیمت تسویه بازار انرژی اروپا [۵۵]

### ۵-۱-۲. بازار ذخیره چرخان

برای اطمینان از عملکرد مطمئن و پایدار شبکه‌های قدرت و امنیت بهره‌برداری از سیستم، سرویس‌های خدمات جانبی از قبیل پاسخ فرکانسی، پاسخگویی بار و ظرفیت چرخان الزامی است [۵۶].

[1] Pay-as-Bid

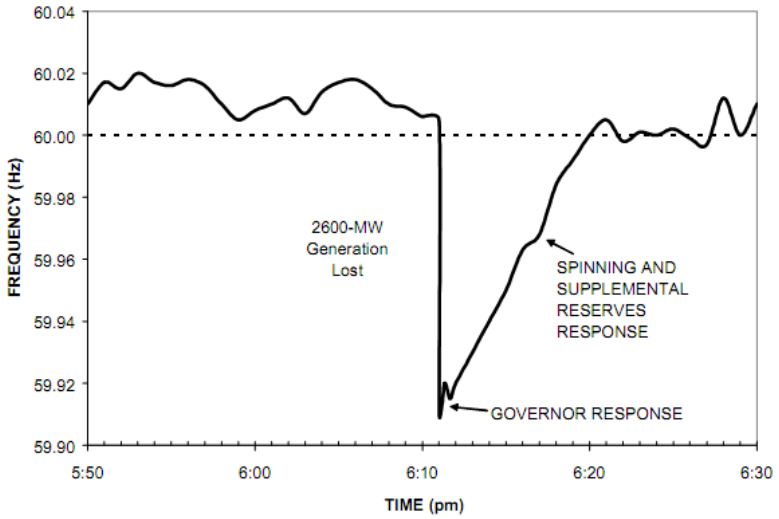
خدمات جانبی خدمات غیر انرژی می‌باشند که که توسط بهره بردار سیستم انتقال (TSO[1])/(ISO) در یک شبکه بهم پیوسته[2] از انتقال انرژی الکتریکی به محل مصرف‌کننده پشتیبانی می‌کنند و امنیت[3] و کیفیت توان[4] سیستم را تامین می‌کنند [۳۱]. تا زمانیکه تعادل بین بار و تولید حفظ شود، نیازی به خدمات جانبی نمی‌باشد اما هنگامیکه خروج خطوط انتقال، شرایط نامساعد آب وهوایی و اتفاقات غیر منتظره رخ دهد، خدمات جانبی به صورت توان‌های رزرو آماده به کار وارد مدار می‌شوند.

افزایش ناگهانی بار، خطاهای منجر به خروج ژنراتورها و خطوط انتقال از جمله مواردی است که باعث عدم تعادل توان و کاهش پایداری شبکه می‌شود. لذا برای حفظ امنیت سیستم و تثبیت فرکانس شبکه، در نظر گرفتن مقداری از انرژی نیروگاه‌های سنکرون با شبکه که بتواند در مدت حداکثر ۱۰ دقیقه به ماکزیمم ظرفیت خروجی خود برسد، برای ذخیره چرخان الزامی است [۵۷, ۵۸]. مرجع [۵۹] ذخیره چرخان را به صورت افزایش قابلیت تولید در واحدهای در حال کار معرفی می‌کند یا به عبارت دیگر تفاضل تمامی ظرفیت سنکرون با شبکه از میزان تولید ژنراتورها می‌باشد. بدیهی است که میزان تولید همان مجموع تلفات و بار کل سیستم است.

هنگامیکه عدم تعادل تولید و بار رخ می‌دهد فرکانس شبکه دچار نوسان می‌گردد. به عنوان مثال هرگاه بنا به دلایلی از قبیل خروج یک خط میزان تولید از بار بیشتر شود، فرکانس افزایش و هرگاه مقدار مصرفی بار از تولید بیشتر شود، فرکانس کاهش خواهد یافت که این مسئله به ضرر شبکه می‌باشد. نوسانات فرکانس هر چه سریع‌تر باید میرا شوند و قابلیت اطمینان شبکه افزایش یابد. برای حل این مشکل دو نوع پاسخ فرکانسی اولیه و ثانویه در نظر می‌گیریم. در پاسخ فرکانسی اولیه در مدت زمان نسبتا کوتاهی توسط گاورنر ژنراتور، نوسانات اولیه فرکانس میرا می‌شود و در پاسخ فرکانسی ثانویه در کمتر از چند دقیقه کنترل تولید اتوماتیک (AGC) فرکانس را به مقدار نامی۶۰

[1] Transmission System Operator
[2] Interconnected
[3] Safety
[4] Power Quality

هرتز برمی‌گرداند. AGCها معمولا باس اسلک شبکه می‌باشند و نمی‌توانند بیش از چند دقیقه در مدار باشند. لذا به منظور تثبیت فرکانس و پایداری شبکه به ظرفیتی سنکرون با شبکه که بتواند بیش از چند دقیقه تا ۲ ساعت در مدار باشد نیاز است. در شکل زیر نحوه تغییرات فرکانس در شرایط ناگهانی از دست دادن تولید و سپس میرا شدن این نوسانات توسط کنترل‌کننده‌ها و سیستم‌های رزرو نشان داده شده است.




شکل۵-۲: استفاده از سرویس‌های رزرو برای بازگرداندن پایداری سیستم قدرت [۶۰]

انواع خدمات جانبی براساس مدت تدوام پاسخ‌گویی آنها از یکدیگر متمایز می‌گردد. در جدول ۵-۱ به تشریح برخی از این خدمات پرداخته شده است. در واقع سه نوع سرویس رزرو ذکر شده برای بازیابی تعادل تولید و بار در مواقع غیر منتظره مانند از دست دادن ژنراتور، خروج ناگهانی خط انتقال و ... کاربرد دارد. در حالیکه سرویس کنترل ولتاژ از نوع توان اکتیو نمی‌باشد. این سرویس به منظور حفظ ولتاژهای قابل قبول سیستم قدرت، توان راکتیو مورد نیاز در شرایط نرمال و یا پیشامدهای ناگهانی را تامین می‌کند.

همانطور که قبلا هم ذکر شد قبل از تجدید ساختار صنعت برق تامین سرویس‌های خدمات جانبی بر عهده بهره‌بردار مستقل شبکه بوده که هنگام نیاز به خدمات جانبی از یک یا تعدادی از نیروگاه‌های مناسب به صورت اجباری استفاده می‌شده است. هزینه‌های خدمات جانبی نیز جزو هزینه‌های مصرفی

مشترکین محسوب شده و به صورت عادلانه بین آنها تقسیم می‌شود. اما در محیط تجدید ساختار یافته، بازار خدمات جانبی برای تبادل و تسویه خدمات جانبی، فراهم آمده است. ذخیره چرخان نیز به عنوان یکی از سرویس‌های خدمات جانبی به صورت یک کالا در بازار خدمات جانبی مورد تبادل قرار می‌گیرد. در ادامه به معرفی انواع بازارهای ذخیره چرخان و نحوه تسویه بازار رزرو پرداخته شده است.

جدول۵-۱: تعریف برخی خدمات جانبی مهم [۶۱]

| خدمات | شرح خدمات جانبی | سرعت پاسخ | طول مدت تداوم |
|---|---|---|---|
| **تنظیم** | منابع توان آماده به کار یا AGC که سرعت پاسخ‌گویی نسبتا خوبی به نیازهای اپراتور سیستم دارند. نوسانات بار سیستم را به صورت دقیقه به دقیقه تعقیب می‌کنند و در مواقع لزوم تنظیم بالا یا پایین از یک نقطه کاری از قبل تعیین شده انجام می‌دهند. | حدود ۱ دقیقه | چندین دقیقه |
| **رزرو چرخان** | منابع توان آماده به کار و سنکرون با شبکه که می‌توانند در کمتر از ۱۰ دقیقه به حداکثر ظرفیت کامل خود برسند و خروجی ژنراتور را به محض خروج یک خط انتقال افزایش دهند. | چند ثانیه تا ۱۰ دقیقه | ۱۰ تا ۱۲۰ دقیقه |
| **رزرو مکمل** | همانند رزرو چرخان می‌باشند با این تفاوت که واحدها می‌توانند خاموش باشند و سریعا به شبکه وارد نشوند. این نوع رزرو قادر به رسیدن به حداکثر ظرفیت خود در طول ۱۰ دقیقه می‌باشد. | کمتر از ۱۰دقیقه | ۱۰ تا ۱۲۰ دقیقه |
| **رزرو جایگزین** | همانند رزرو مکمل می‌باشند با این تفاوت که زمان پاسخ‌گویی آنها ۳۰ دقیقه می‌باشد.از رزرو جایگزین به منظور بازیابی رزروهای مکمل و چرخان به وضعیت قبل از پیشامد استفاده می‌گردد. | کمتر از ۳۰ دقیقه | ۲ ساعت |
| **کنترل ولتاژ** | کنترل ولتاژ به منظور جذب یا تزریق توان راکتیو شبکه برای حفظ ولتاژهای سیستم انتقال در مقیاس‌های خواسته شده، انجام می‌شود. | چند ثانیه | چند ثانیه |

### ۵-۱-۲-۱. تسویه بازار ذخیره چرخان

همانطور که ذکر شد در شبکه‌های سنتی به دلیل ساختار یکپارچه تولید، انتقال و توزیع، خدمات جانبی به صورت جداگانه در نظر گرفته نمی‌شده است. امروزه با تفکیک و خصوصی‌سازی این بخش‌ها، خدمات جانبی نیز از طریق بازارهای رقابتی ارائه می‌شوند. بازار کالیفرنیا (CAISO)، بازار ذخیره نیویورک (NEWYORK)، بازار ذخیره نیوانگلند (NEWENGLAND) و بازار ذخیره PJM نمونه‌هایی از بازارهای رقابتی ذخیره چرخان می‌باشند.

واحدهای تولیدکننده برای ظرفیت تولیدی خود می‌توانند در انواع بازارها از قبیل بازار انرژی، بازار رزرو، بازار تنظیم و ... شرکت نمایند. انگیزه اصلی تولیدکنندگان از شرکت در بازار دستیابی به سود اقتصادی بیشینه می‌باشد [۶۲]. در این قسمت شرکت تولیدکنندگان در بازار ذخیره چرخان بررسی شده است. تولیدکنندگان می‌توانند با شرکت در بازار مستقل رزرو چرخان[1] پیشنهادات خود را ارائه دهند و خریداران نیز می‌توانند با شرکت در این بازار رزرو مورد نیاز خود را تامین نمایند.

تسویه ذخیره چرخان در بازار مستقل رزرو چرخان به اشکال مختلفی صورت می‌گیرد. به عنوان مثال برخی بازارها همچون اسلوونی و استرالیا از طریق قراردادهای دوطرفه رزرو خود را تامین می‌کنند. بازارهای نیویورک و کالیفرنیا با راه‌اندازی بازار حوضچه‌ای (Pool) میزان رزرو خود رافراهم می‌نمایند. امروزه تامین خدمات جانبی از طریق بازار رقابتی مورد توجه قرار گرفته است زیرا رقابت موجب می‌شود که ارزش واقعی کالا به طور واضح شفاف‌سازی شود و امکان حفظ تعادل بین هزینه و سود حاصل از تامین رزرو را به طرفین می‌دهد [۶۳]. به منظور بررسی نحوه تسویه رزرو چرخان، نمونه‌هایی از بازارهای ذخیره مختلف جهان تشریح گردیده است [۶۴-۶۶].

[1] Spinning Reserve Capacity Market

- بازار ذخیره کالیفرنیا (CAISO)

مقدار ذخیره مورد نیاز سیستم از طریق بازار روز قبل[1] فراهم می‌شود. در اثر رخ دادن واقعه ناخواسته از قبیل تغییرات شدید بار و یا خطای پیش‌بینی بار، باقیمانده ذخیره مورد نیاز سیستم از طریق بازار ساعت بعد تهیه می‌شود.

- بازار ذخیره PJM

تسویه بازار ذخیره از طریق لیست حق تقدم براساس قیمت پیشنهادی شرکت‌کنندگان در ابتدای هر ساعت برای ساعت بعدی صورت می‌گیرد.

- بازار ذخیره نیوانگلند (NEWENGLAND)

شرکت‌کنندگان در بازار خدمات جانبی به صورت ساعتی برای روز آینده قیمت پیشنهادی خود را ارائه می‌دهند. ISO با حداقل کردن هزینه‌ها برندگان بازار ذخیره را تعیین می‌کند. زمانیکه بازار شروع به بهره‌برداری کند فقط واحدهای آبی و بارهای قابل مدیریت می‌توانند قیمت پیشنهادی خود را ارائه دهند. ژنراتورهای سوخت فسیلی دیگر نمی‌توانند در زمان شروع بهره‌برداری بازار پیشنهادی ارائه دهند.

اجرای مناقصات در بازار رزرو از لحاظ زمانی به صورت لحظه‌ای (RealTime)، روز قبل (Day-Ahead) و آینده (Forward) بلندمدت یا ترکیبی از اینها می‌باشد. در این قسمت اجرای مناقصات تامین رزرو و انرژی به صورت روز قبل در نظر گرفته می‌شود که شرکت‌کنندگان موظفند از روز قبل برای هر ساعت روز بهره‌برداری مشخصات فنی و قیمت مربوط به تامین رزرو و انرژی را ارائه دهند.

در محیط تجدید ساختار یافته خدمات جانبی و انرژی به صورت کالاهای برق وارد بازار می‌شوند که به دو روش تسویه پشت سرهم[2] و تسویه همزمان، دیسپاچ می‌شوند. در روش تسویه پشت سرهم ابتدا

[1] Day Ahead
[2] Sequential Dispatch

بازار انرژی قیمت‌گذاری می‌کند و سپس نوبت به ذخیره چرخان می‌رسد که میزان نیاز به ظرفیت ذخیره چرخان پس از بسته شدن بازار انرژی با توجه به قابلیت ردیابی بار[1] واحدهای تولیدی، تقاضای بار کل سیستم و ظرفیت اضافی واحدها که قابل استفاده برای تامین رزرو سیستم می‌باشد، تعیین می‌گردد [۶۷]. حال اگر پس از تسویه بازار میزان نیاز ظرفیت چرخان برآورده نشد، از میزان تولید برخی ژنراتورها باید کاسته شود [۶۸]. اما در روش تسویه همزمان قیمت خرید انرژی و ذخیره چرخان همزمان تعیین می‌شود که این روش باعث کاهش هزینه کل می‌شود.

### ۵-۱-۲-۲. هزینه‌های پرداختی در بازار ذخیره

در بازار ذخیره چرخان نیروگاه‌ها پیشنهادات خود را به ISO اعلام می‌نمایند و ISO پس از بررسی، هزینه مشارکت در بازار را به نیروگاه‌ها پرداخت می‌کند. برای محاسبه این هزینه در بازار رزرو چرخان روش‌های متفاوتی وجود دارد اما به طور معمول این هزینه شامل سه بخش جداگانه به ازای آمادگی، تولید انرژی و جبران خسارت اشغال ظرفیت می‌باشد [۴۶, ۶۹]. هزینه آمادگی مربوط به آمادگی واحد تولیدی جهت تولید انرژی و تنظیم تعادل توان در شبکه می‌باشد. هزینه تولید انرژی در صورتی به یک نیروگاه پرداخت می‌شود که به دلیل عدم تعادل توان ناشی از رخدادهای پیش‌بینی نشده شبکه، ISO مجبور به فراخوانی واحد آماده جهت تولید توان شود. در غیر اینصورت نیز بخشی از توان واحد که می‌توانست در بازار انرژی به فروش برسد، جهت تنظیم فرکانس به صورت رزرو و آماده نگه داشته شده است. واحد آماده از این جهت متحمل خسارتی می‌شود که باید توسط ISO به صورت هزینه‌ای جداگانه به نیروگاه پرداخت شود. بنابراین واحدهای تولیدی در این قسمت هزینه فرصت از دست رفته[2] دریافت می‌کنند. فرصتی که در آن می‌توانستند ظرفیت خود را بجای بازار رزرو در بازار انرژی بفروشند. لذا هزینه فرصت از دست رفته به صورت سودی که واحد می‌توانست از فروش در بازار

[1] Load following
[2] Opportunity Cost

انرژی بدست آورد تعریف می‌گردد و معادل با درآمد ناشی از کاهش تولید منهای هزینه ناشی از کاهش تولید مدلسازی می‌شود [۶۹]. با توجه به اینکه مالکین به دنبال سود مناسب و منطقی در جهت ایجاد انگیزه برای مشارکت در بازار رزرو می‌باشند، هزینه فرصت از دست رفته باید جبرانگر عدم فروش در بازار انرژی باشد [۷۰].

## ۵-۲. مشارکت V2G در بازار ذخیره چرخان به منظور کنترل فرکانس

همانگونه که در فصل‌های قبلی ذکر شد نرخ بالای شارژ و دشارژ باتری‌های مدرن امروزی سبب شده تا V2Gها برای سرویس‌های خدمات جانبی شبکه مانند تنظیم فرکانس و رزرو چرخان مورد توجه قرار گیرند [۹, ۷۱]. از سوی دیگر خودروها در طول شبانه‌روز مدت زمان زیادی را در پارکینگ‌ها سپری می‌کنند. به عنوان مثال ممکن است خودرویی در مدت ۲ ساعت شاررژ کامل شود اما ۵ ساعت بلااستفاده در پارکینگ باشد. لذا انرژی ذخیره در باتری خودرو می‌تواند در مواقع لزوم به شبکه تزریق شده و مجددا در مواقع مناسب از شبکه شارژ شود. بنابراین شرایط این خودروها برای مشارکت در تامین رزرو چرخان قابل قبول می‌باشد و می‌توان از انرژی ذخیره شده در آنها استفاده بهینه نمود.

اگر بتوان تجمع خودروها را هوشمندانه کنترل و شارژ و دشارژ آنها را مدیریت نمود، شرکت V2Gها در تامین انواع خدمات جانبی توجیه‌پذیر خواهد بود. به منظور تجمع این خودروها به یک نهاد مرکزی نیاز می‌باشد. اگر تعداد قابل توجهی از خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه به صورت هماهنگ تحت کنترل و مدیریت هوشمندانه یک نهاد گردهم‌آورنده به شبکه متصل شوند می‌توانند همانند یک نیروگاه مجازی کوچک با سرعت راه‌اندازی بالا رفتار کنند. به عبارت دیگر این نهاد با توجه به مقدار شارژ موجود در باتری‌های تحت کنترل خود می‌تواند به یک منبع بزرگ از مقدار ظرفیت و مقدار انرژی ذخیره شده دست یابد. معمولا برای تامین رزرو چرخان نیز به یک منبع با ظرفیت بزرگ و آماده به کار نیاز می‌باشد. بنابراین نهاد گردهم‌آورنده با توجه به پیش‌بینی‌های ساعتی خود در مورد قیمت بازارهای انرژی و ذخیره چرخان و مقدار انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای برقی تحت اختیار خود و همچنین با رعایت تمام خواسته‌های صاحبان خودروهای برقی در مورد وضعیت شارژ

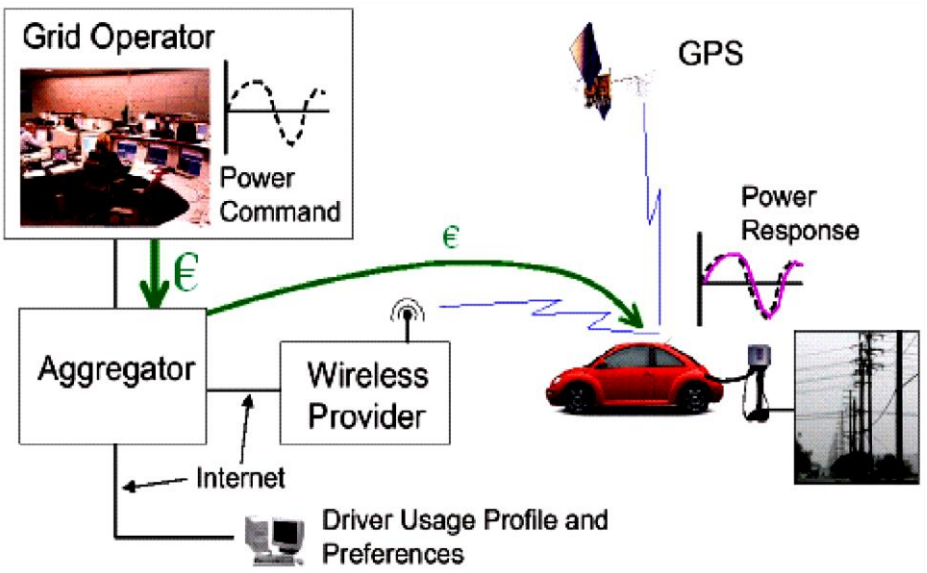
باتری‌های خود می‌تواند در بازار ذخیره چرخان شرکت کند. این نهاد هنگام فراخوان شدن از سوی بهره‌بردار مستقل شبکه انرژی موجود در باتری خودروها را تخلیه می‌کند و به شبکه انرژی تزریق می‌نماید. این نهاد با عنوان نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی شناخته می‌شود.

## ۵-۳. نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی

نیاز به نهاد گردهم‌آورنده به عنوان یکی از بازیگران بازار خدمات جانبی، جهت تجمیع و مدیریت خودروهای متصل به شبکه، غیر قابل انکار می‌باشد. بعضی از انواع شرکت‌ها که می‌توانند در نقش نهاد گردهم‌آورنده ظاهر شوند، اپراتورهای تلفن همراه، شرکت‌های سازنده خودروها و خرده‌فروش برق می‌باشند [۱۸]. علاوه بر این نهاد گردهم‌آورنده می‌تواند به عنوان یک شرکت مستقل نظارتی نیز در نظر گرفته شود. این شرکت به صورت یک واسطه‌گر خودروها را از اقصی نقاط شبکه جمع می‌کند، کنترل آنها را بر عهده می‌گیرد و سپس با بهره‌بردار سیستم قرارداد منعقد می‌کند [۷۲].

به واسطه کنترل‌کننده‌های شارژ موجود روی خود خودرو و آگاهی از داده‌های لحظه‌ای از قبیل مکان، ظرفیت قدرت اتصال و نیز وضعیت شارژ باتری (SOC)، پروفایل‌های رانندگی صاحبان خودرو در اختیار نهاد گردهم‌آورنده قرار می‌گیرد. لذا نهاد گردهم‌آورنده از تعداد خودروهایی که ممکن است در هر ساعت از روز به شبکه متصل شوند و نیز از مقدار انرژی الکتریکی و مقدار توانی که انتظار می‌رود در دسترس باشد، اطلاع می‌یابد. در مرجع [۷۳] دو موقعیتی که در آن بهره‌بردار مستقل شبکه به طور مستقیم یا از طریق واسطه‌گر نهاد گردهم‌آورنده با صاحب خودرو قرارداد منعقد می‌کند، مقایسه شده است. نهاد گردهم‌آورنده سیگنال‌های درخواست را از اپراتور سیستم دریافت می‌کند و فرمان‌های لازم را به خودروهای در دسترس و مایل به فروش سرویس، صادر می‌نماید. در اینصورت صاحبان خودرو در ارتباط با وارد شدن یا ترک ایستگاه شارژ، تعهدات خود را به نهاد اعلام می‌دارند و نهاد گردهم‌آورنده نیز می‌تواند پیشنهادات خود را به بازار خدمات جانبی ساعتی ارائه دهد. نتایج نشان می‌دهند از طریق ارتباط مستقیم با هر یک از خودروها در بازه‌های زمانی طولانی، دسترسی به صاحبان خودروها خیلی کمتر می‌شود. در واقع به دلیل رفتار غیرقابل کنترل صاحبان خودروها شکل

مستقیم ارتباط دارای قابلیت اطمینان بسیار کمی می‌باشد. این در حالیست که نهاد گردهم‌آورنده قابلیت اطمینان خود را با کنترل ظرفیت موجود و مقدار توان مورد قرارداد، کنترل می‌نماید. لذا دسترس‌پذیری نهاد گردهم‌آورنده نسبتا قابل توجه در حدود ۱۰۰٪ می‌باشد و می‌تواند در هر زمانی برای سرویس‌های رزرو، قرارداد منعقد نماید.




شکل۵-۳: ارتباطات فنی و اقتصادی نهادگردهم‌آورنده با بهره بردار مستقل شبکه و خودروهای برقی متصل به شبکه [۷۴]

نهاد گردهم‌آورنده به یک مدل تجاری[1] مناسب نیاز دارد تا بتواند رضایت صاحبان خودروی طرف قرارداد را جلب کند. درمراجع مختلف مدل‌های تجاری متفاوتی برای نهاد گردهم‌آورنده ارائه شده است [۱۳, ۱۴]. در یکی از مدل‌های ارائه شده، تمامی خودروها در یک پارکینگ خاص قرار دارند و از یک نقطه به شبکه متصل می‌شوند. نهاد گردهم‌آورنده زمان اتصال به شبکه و حضور خودروها را مدیریت می‌کند تا در مواقع لزوم خدمات را مستقیما به بهره بردار سیستم یا بازار برق بفروشد.

در مدل دیگر، نهاد گردهم‌آورنده به عنوان یک شرکت خرده‌فروش برق می‌باشد. در این مدل نهاد گردهم‌آورنده هیچگونه کنترلی روی تک تک خودروها نخواهد داشت اما برای جلب رضایت مشتریان،

[1] Business mode

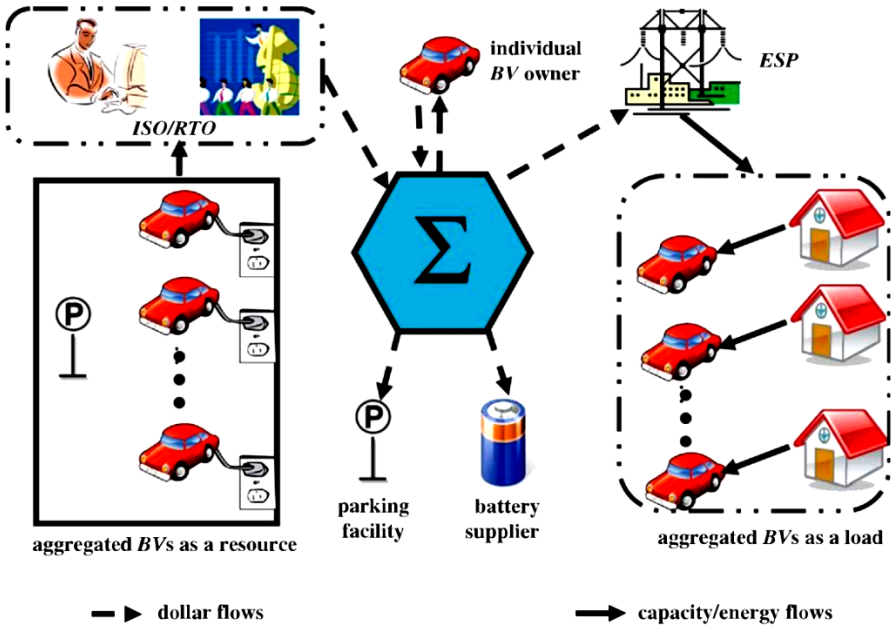
برنامه‌های تشویقی به کار برده است. امتیازاتی مانند تخفیف قیمت شارژ، کاهش هزینه پارکینگ خودروها و ... در ازای استفاده از باتری‌ها در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر صاحبان خودرو نیز مقید می‌شوند در زمان‌های تعیین شده در قرارداد، اتصال خود را برقرار کنند. اگر صاحبان خودرو قید مقرر را رعایت نکنند با از دست دادن میزان تخفیف یا نگهداری از باتری جریمه خواهند شد. لذا مجموعه‌ای از خودروها که به صورت پراکنده از نقاط مختلف به شبکه متصل می‌شوند در اختیار نهاد می‌باشند. نهاد گردهم‌آورنده نیز انرژی ذخیره شده در باتری خودروها را خریداری کرده و به بازار برق می‌فروشد.

در مدل سوم، نهاد گردهم‌آورنده به عنوان شرکت‌های تجاری مختلف مانند کارخانه سازنده باتری، شبکه تلفن همراه و مدیر تولیدپراکنده[1] معرفی شده است. لذا نهاد گردهم‌آورنده می‌تواند عملیات ارتباطی را فراهم کند. با فرض اینکه نهاد گردهم‌آورنده کارخانه سازنده باتری باشد می‌تواند تعویض رایگان باتری‌ها را بر عهده بگیرد و در مقابل با فروش انرژی موجود در باتری خودروها سود کسب کند.

در شکل زیر سه نوع مدل تجاری مختلف نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه نمایش داده شده است. در این شکل نهاد گردهم‌آورنده می‌تواند به عنوان یک کارخانه سازنده باتری مسئولیت شارژ رایگان باتری خودروهای برقی را بر عهده بگیرد. در این حالت شبکه قدرت در ازای دریافت هزینه شارژ باتری از نهاد گردهم‌آورنده، باتری خودروهای برقی پارک شده در منازل شخصی را در زمان‌های مناسب کم‌باری به عنوان بار شارژ می‌کند. در مدل دوم، نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی به عنوان مسئول پارکینگ حضور می‌یابد که در ازای دریافت پول از بهره‌بردار مستقل شبکه به او اجازه استفاده از انرژی ذخیره موجود در باتری خودروهای برقی را می‌دهد. در این حالت هنگامی‌که خودروهای برقی در پارکینگ‌های عمومی می‌باشند، می‌توانند در تامین خدمات جانبی از قبیل کنترل فرکانس شبکه قدرت و یا بازار ذخیره چرخان نقش داشته باشند. در مدل سوم، نهاد گردهم‌آورنده

[1] Distributed Generation

خودروهای برقی با تک تک خودروها در ارتباط مستقیم می‌باشد و برای شارژ باتری خودروها و یا استفاده از انرژی ذخیره شده در باتری‌ها به صورت مستقیم قرارداد منعقد می‌کند.




شکل۵-۴: شماتیک مدل‌های تجاری مختلف نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی [۱۳]

با توجه به مدل‌های تجاری مختلف بیان شده در تفسیر نهاد گردهم‌آورنده نتیجه می‌شود که این نهاد با هدف کسب سود بیشینه به مدیریت و کنترل هوشمندانه خودروهای برقی می‌پردازد. با توجه به قابلیت‌های V2Gها برای مشارکت در بازار ذخیره چرخان، نهاد گردهم‌آورنده نیز می‌تواند به راحتی در بازار رزرو شرکت نماید. در واقع این نهاد می‌تواند با شارژ هماهنگ خودروها هنگام پایین بودن قیمت انرژی الکتریکی (متناسب با زمان‌های کم‌باری شبکه) و دشارژ هماهنگ خودورها هنگام بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی (متناسب با زمان‌های پیک بار شبکه) علاوه بر شرکت در انواع بازارهای انرژی و انواع بازارهای خدمات جانبی و افزایش سود خود موجب کسب درآمد برای صاحبان خودروها نیز شود. بنابراین نهاد گردهم‌آورنده به عنوان یکی از بازیگران جدید بازار برق محسوب می‌شود.

به منظور کسب سود و شرکت در بازار ابتدا باید هزینه و درآمدهای نهاد گردهم‌آورنده را مدل کرد. هزینه‌های نهاد گردهم‌آورنده شامل هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر می‌باشد. هزینه‌های ثابت شامل هزینه احداث کانال‌های مخابراتی، هزینه خرید و نصب دستگاه‌های کنترلی، هزینه خرید و

نصب دستگاه‌های اندازه‌گیری به منظور اندازه‌گیری و مخابره اطلاعاتی از قبیل زمان و مقدار توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی می‌باشد. تعمیرات پیشگیرانه شبکه مخابراتی، کنترلی و اندازه‌گیری نیز مشتمل هزینه‌های ثابت است. هزینه‌های متغیر نهاد گردهم‌آورنده هزینه مربوط به خرید انرژی الکتریکی به منظور شارژ باتری خودروهای برقی قابل کنترل می‌باشد.

درآمدهای نهاد گردهم‌آورنده شامل درآمدهای حاصل از شرکت در انواع بازارهای انرژی و خدمات جانبی است. از سوی دیگر دریافت هزینه شارژ باتری از صاحبان V2Gهای تحت کنترل نهاد و هزینه تولید انرژی در صورت فراخوانی از سوی ISO نیز مشتمل درآمد نهاد گردهم‌آورنده خواهد بود.

## ۵-۴. خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده

تامین ذخیره چرخان از دو دیدگاه بهره‌بردار مستقل شبکه و نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی، قابل بررسی است. در این قسمت دیدگاه نهاد گردهم‌آورنده در بازار ذخیره نیوانگلند مورد بررسی قرار می‌گیرد. نهاد گردهم آورنده با در نظر گرفتن ریسک ناشی از خطای پیش‌بینی پارامترهای غیر قطعی مساله اقدام به تامین ذخیره چرخان می‌کند. سپس بهره‌بردار مستقل شبکه با دریافت پیشنهادات بازیگران بازار از قبیل ژنراتورها و نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی سعی دارد ذخیره چرخان شبکه را تسویه نماید.

آن دسته از صاحبان خودروهای برقی که هنگام اتصال به شبکه، سیستم مخابراتی و کنترلی خودروهای خود را روشن می‌کنند تا نهاد گردهم‌آورنده با مدیریت هوشمندانه خود آنها را کنترل نماید می‌توانند از مزایای اقتصادی شارژ ارزان استفاده نمایند. نهاد گردهم‌آورنده نیز برای خود قوانین خاصی لحاظ کرده که صاحبان خودرو ملزم به رعایت آنها می‌باشند. از جمله این قوانین رعایت قید حداقل مدت زمان اتصال خودرو به شبکه تحت کنترل نهاد می‌باشد. به عبارت دیگر صاحبان خودروها برای بهره‌مندی از مزایای اقتصادی شارژ ارزان نباید زودتر از کمینه مدت زمان مورد نظر نهاد، اتصال خود را از شبکه قطع نمایند.

نهاد گردهم‌آورنده نیز به منظور اطمینان دادن به صاحبان خودروهای برقی از خالی نبودن باتری خودروهای خود هنگام انفصال از شبکه، کمینه مقدار شارژ باتری خودروها را باید رعایت کند. به عبارت دیگر صاحبان خودورهای برقی که قید کمینه مدت زمان اتصال به شبکه تحت کنترل نهاد را رعایت کرده‌اند، هنگام انفصال از شبکه باید دارای مقدار کمینه شارژ مورد نظر باشند.

بعضی از صاحبان خودروهای برقی با خاموش نگه داشتن سیستم‌های کنترلی و مخابراتی خود، از دخالت نهاد در کنترل و مدیریت شارژ باتری‌های خود جلوگیری کرده و باتری خودروهای خود را با قیمت لحظه‌ای بازار شارژ و مبلغ آن را پرداخت می‌نمایند.

رفتار احتمالاتی خودروها برای زمان متصل شدن به شبکه تحت کنترل نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی و همچنین وضعیت احتمالاتی قیمت‌های بازار انرژی و بازار ذخیره چرخان، مساله برنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده را با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه کرده است. علاوه بر این پارامترهای غیر قطعی دیگری نیز وجود دارند که به شرح زیر می‌باشد:

- مدت زمان اتصال خودروها به شبکه تحت کنترل نهاد گردهم‌آورنده
- قیمت بیست و چهار ساعته بازار انرژی الکتریکی
- قیمت بیست و چهار ساعته بازار ذخیره چرخان
- وضعیت شارژ باتری خودروها هنگام اتصال به شبکه تحت کنترل نهاد گردهم‌آورنده
- مقدار احتمال فراخوان شدن نهاد گردهم‌آورنده از سوی بهره بردار مستقل شبکه برای تولید انرژی در بازار ذخیره چرخان
- تعداد خودروهای جدیدی که در هر ساعت به شبکه متصل می‌شوند.

محدود بودن انرژی یک بازیگر بازار مساله خودبرنامه‌ریزی را کاملا تحت تاثیر قرار می‌دهد. نهاد گردهم‌آورنده به دلیل محدودیت در تعداد خودروها و همچنین وضعیت شارژ باتری خودرو، یک بازیگر با انرژی محدود محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای غیر قطعی، محدود بودن انرژی

نهاد گردهم‌آورنده و نیز ملاحظات مربوط به بازار، مساله خودبرنامه‌ریزی با دشواری‌های بیشتری مواجه می‌گردد. علاوه بر این مساله خودبرنامه‌ریزی کاملا متاثر از خطای ناشی از پیش‌بینی پارامترهای غیر قطعی می‌باشد که باید به طور دقیق مدلسازی شود. در واقع خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده در یک چارچوب و مدل خاصی تدوین شده است. در این مدل نهاد گردهم‌آورنده مسئول حداکثرسازی سود خود می‌باشد. ورودی‌های مربوط به مسئله بهینه‌سازی، شامل پیش‌بینی‌های ساعتی قیمت بازارهای انرژی و ذخیره چرخان، مقدار احتمال فراخوان شدن نهاد گردهم‌آورنده از سوی ISO و نیز پیش‌بینی ساعتی رفتار غیر خطی صاحبان خودروهای برقی متصل به شبکه می‌باشد. خروجی‌های مسئله شامل پیشنهاد ساعتی مقدار انرژی در دسترس نهاد گردهم‌آورنده به بازار ذخیره چرخان، تقاضای ساعتی مقدار توان مورد نیاز نهاد گردهم‌آورنده از بازار انرژی و همچنین مقدار بهینه هزینه شارژ دریافتی از صاحبان V2G می‌باشد.

به دنبال خودبرنامه‌ریزی یک نهاد گردهم‌آورنده به منظور کسب سود بیشینه در بازار، ممکن است بازیگرانی مشابه نهاد گردهم‌آورنده در محیط بازار وجود داشته باشند که هر یک درصدد کسب سود ماکزیمم باشند. لذا رفتارهای متشابهی که این نهادها از خود نشان می‌دهند محیط بازار را به سمت رقابتی شدن پیش خواهد برد. موضوعی که در هیچ یک از مراجع در نظر گرفته نشده عملکرد نهادگردهم‌آورنده به عنوان یکی از بازیگران بازار و امکان رقابت آن با بازیگران مشابه خود می‌باشد. به عبارت دیگر در یک شبکه هوشمند ممکن است چندین نهاد گردهم‌آورنده با یکدیگر در رقابت باشند. در این صورت برنامه‌ریزی یک نهاد گردهم‌آورنده باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر ماکزیمم کردن سود خود، سرویس‌های بهتری به V2Gها برای جلب مشتری ارائه نماید. در ادامه به بحث در مورد مساله خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده در محیط رقابتی و مدلسازی آن پرداخته شده است.

در ادامه این فصل برنامه بهینه‌ای برای نهاد گردهم‌آورنده جهت شرکت در بازار ذخیره چرخان در یک محیط رقابتی ارائه می‌شود. در نظر گرفتن رفتار نهاد رقیب و نیز واکنش غیرخطی خودروهای برقی به این رفتار از پیچیدگی‌های این برنامه‌ریزی می‌باشد. مساله خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده برای

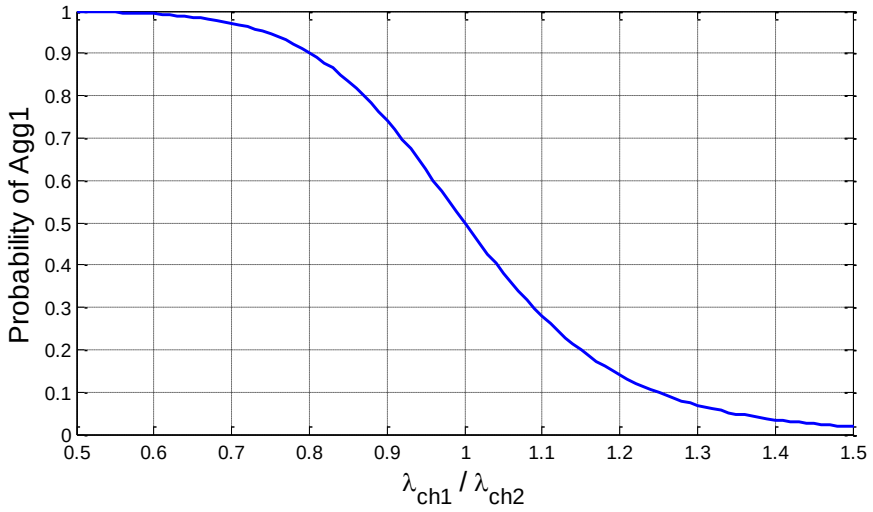
شرکت در بازار ذخیره چرخان یک مساله برنامه‌ریزی احتمالاتی و غیر خطی بوده و برای بهینه‌سازی این مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

## ۵-۵. محیط رقابتی

با توجه به زیرساخت‌های گسترده شبکه هوشمند و مدارات واسطه الکترونیکی، رادیویی و مخابراتی نصب شده در خودروها که امکان استفاده از قابلیت‌های خودروهای برقی را میسرتر می‌سازد، انگیزه کافی برای افراد متخصص در این زمینه ایجاد می‌شود تا با بهره‌گیری هر چه بیشتر از این خودروها به دنبال کسب درآمد برای خود باشند. لذا با بکارگیری V2Gها در موارد مختلف پشتیبانی از شبکه می‌توان به توجیه اقتصادی و درآمدزایی این خودروها پی برد. اما در این میان تنها یک نهاد به فکر کسب سود نیست بلکه با توجه به شرایط فراهم موجود، ممکن است چندین نهاد درصدد استفاده اقتصادی از V2Gها باشند. لذا امکان رقابت برای چندین نهاد به وجود خواهد آمد. امکان وجود چندین نهاد مشابه برای مدیریت خودروهای برقی و حضور همزمان این ارگان‌ها در بازار ذخیره چرخان، از موضوعاتی است که برای نخستین بار در این پایان‌نامه به آن پرداخته شده است و از نوآوری‌های پایان‌نامه محسوب می‌شود. مطالعات عددی تاثیر بسیار زیاد رفتار نهاد رقیب در برنامه‌ریزی بهینه نهاد اول و سود آن را نشان می‌دهد.

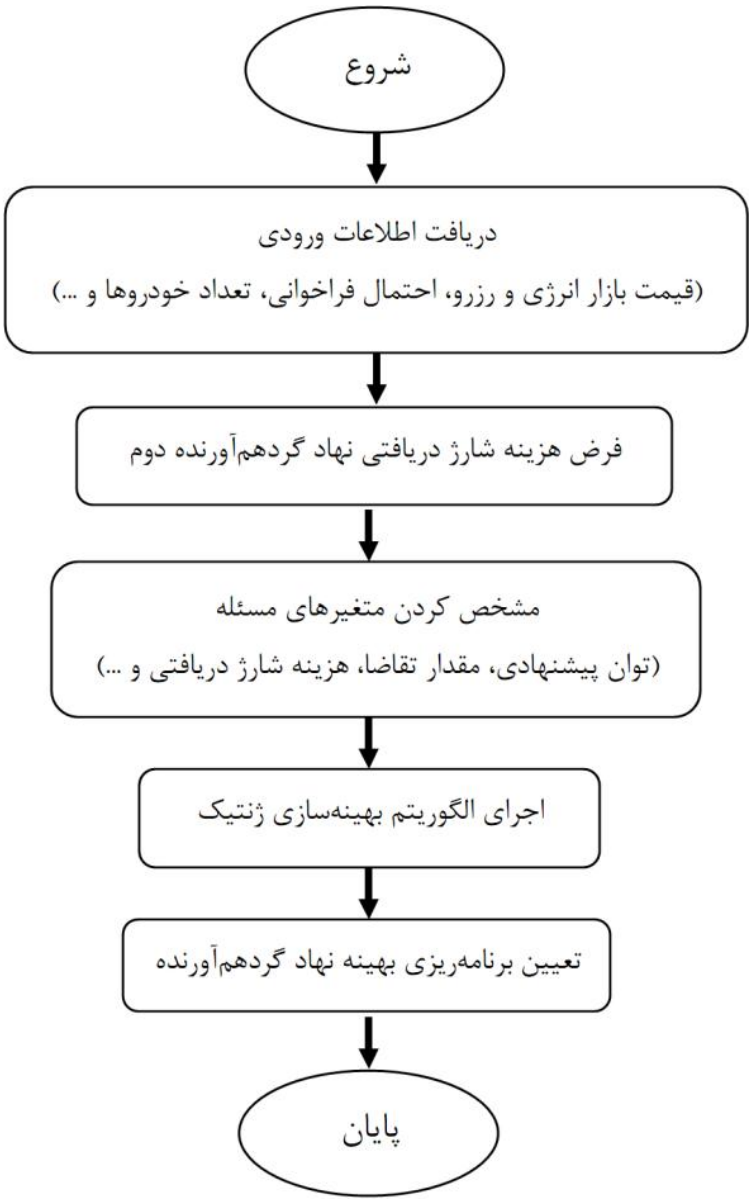
یکی از پارامترهای تاثیرگذار در سود نهایی نهاد گردهم‌آورنده، هزینه دریافتی از V2G بابت شارژ می‌باشد که با $\lambda_{ch1}$ نشان داده شده است. در بسیاری از مراجع این پارامتر به صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود [۴۴, ۷۵]. اما بدیهی است در یک محیط انحصاری، نهاد گردهم‌آورنده می‌تواند این پارامتر را به میزان دلخواه افزایش داده و سود بیشتری کسب نماید. البته در یک محیط رقابتی با حداقل دو نهاد گردهم‌آورنده، افزایش $\lambda_{ch1}$ از سوی یک نهاد باعث گرایش خودروها به نهاد دیگر برای شارژ باتری خواهد شد. در این‌صورت تعیین مقدار بهینه $\lambda_{ch1}$ نیز از پارامترهای مهم در برنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده می‌باشد.

رفتار غیر خطی خودروها در واکنش به تغییرات $\lambda_{ch1}$ یا همان هزینه شارژ دریافتی از صاحبان خودروها مطابق شکل ۵-۵ مدلسازی شده است. این شکل احتمال گرایش یک خودرو به نهاد اول را بر حسب تغییرات $\lambda_{ch1}$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست خودروها به سوی نهاد گردهم‌آورنده با هزینه دریافتی کمتر روی می‌آورند. به عبارت دیگر اگر هزینه شارژ یکسان از سوی نهاد گردهم‌آورنده اول و دوم از صاحبان خودروها دریافت شود میزان گرایش خودروها به سوی هر یک از این نهادها با احتمال یکسان رخ خواهد داد. اما اگر هزینه شارژ دریافتی نهاد اول از هزینه دریافتی نهاد دوم بیشتر باشد و نسبت $\lambda_{ch1}/\lambda_{ch2}$ بزرگتر از یک گردد، خودروها با احتمال کمتری جذب نهاد گردهم‌آورنده اول خواهند شد. همچنین اگر نهاد گردهم‌آورنده اول با قیمت ارزان‌تری نسبت به نهاد گردهم‌آورنده دوم خودروها را شارژ کند، در این صورت میزان جذب خودروها به این نهاد افزایش خواهد یافت. با مشخص بودن این نسبت‌ها و مقدار احتمالی مربوط به هر یک از آنها، یک منحنی به صورت شکل زیر می‌توان فرض نمود. با استفاده از روش‌های متعددی نظیر روش برازش منحنی (Curve Fitting)، تابع چندجمله‌ای مربوط به منحنی به دست می‌آید. این تابع غیر خطی که نشان‌دهنده رفتار غیر خطی خودروها در واکنش به تغییرات هزینه شارژ دریافتی از آنها می‌باشد، ملزومات یک بهینه‌سازی غیر خطی را فراهم می‌نماید.




شکل۵-۵: احتمال گرایش یک خودرو به نهاد گردهم‌آورنده اول

با در نظر گرفتن این مدل در محیط رقابتی، برنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده یک بهینه‌سازی با قیود غیرخطی خواهد بود. زیرا به عنوان مثال حداکثر انرژی در دسترس جهت پیشنهاد به بازار ذخیره چرخان، تابعی از تعداد خودروهاست که این مقدار نیز تابعی غیرخطی از پارامتر متغیر $\lambda_{ch1}$ است. تعیین همزمان مقادیر بهینه پیشنهادهای ساعتی انرژی و خرید انرژی و نیز پارامتر $\lambda_{ch1}$ نیازمند یک الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند و هوشمند می‌باشد. در شکل زیر مراحل رسیدن به نتایج بهینه در قالب یک فلوچارت آورده شده است.




شکل ۵-۶: مراحل رسیدن به نتایج مسئله

## ۵-۶. الگوریتم پیشنهادی

به طور کلی درآمد نهاد گردهم‌آورنده شامل هزینه دریافتی از خودروها بابت شارژ باتری، هزینه آمادگی در بازار رزرو چرخان و هزینه تولید انرژی در صورت فراخوانی از سوی ISO می‌باشد. از سوی دیگر نهاد گردهم‌آورنده باید هزینه انرژی مصرفی جهت شارژ معمول باتری‌ها و انرژی اضافی در صورت فراخوانی از سوی ISO را به شبکه بپردازد. بنابراین می‌توان سود خالص نهاد گردهم‌آورنده را به صورت زیر بیان کرد:

$$Profit = Income_1 + Income_2 + Income_3 - Cost_1 - Cost_2 \quad (۱-۵)$$

در ادامه هر یک از عناصر رابطه فوق به تفکیک تشریح می‌شوند.

$Income_1$: درآمد مربوط به هزینه آمادگی

$Income_2$: درآمد مربوط به هزینه تولید انرژی

$Income_3$: درآمد مربوط به هزینه شارژ دریافتی از خودروها بابت شارژ باتری آنها

$Cost_1$: هزینه انرژی مصرفی جهت شارژ معمول باتری‌ها

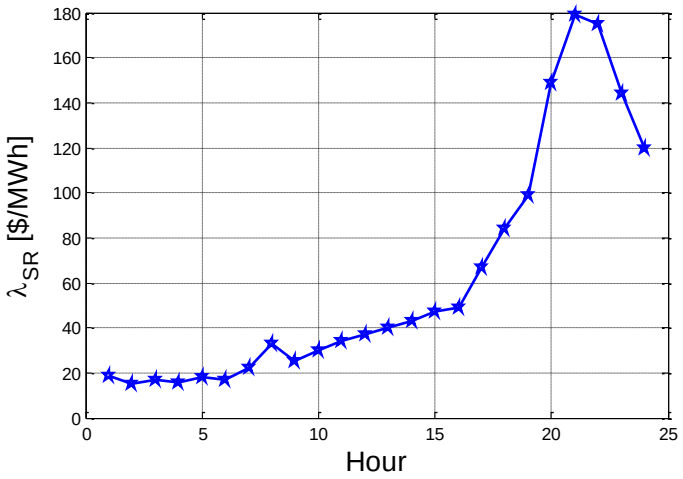
$Cost_2$: هزینه انرژی اضافی در صورت فراخوانی نهاد گردهم‌آورنده از سوی ISO

هر یک از عناصر تعریف شده از روابط زیر به دست می‌آیند.

اولین بخش درآمد یعنی $Income_1$، مربوط به هزینه آمادگی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Income_1 = \sum BidAgg \,.\, \lambda_{SR} \quad (۲-۵)$$

که در آن $BidAgg$، مقدار انرژی پیشنهادی ساعتی نهاد گردهم‌آورنده به بازار ذخیره چرخان می‌باشد. $\lambda_{SR}$ نیز قیمت ساعتی بازار ذخیره چرخان است که از بین چند سناریوی مختلف به صورت زیر انتخاب شده است:

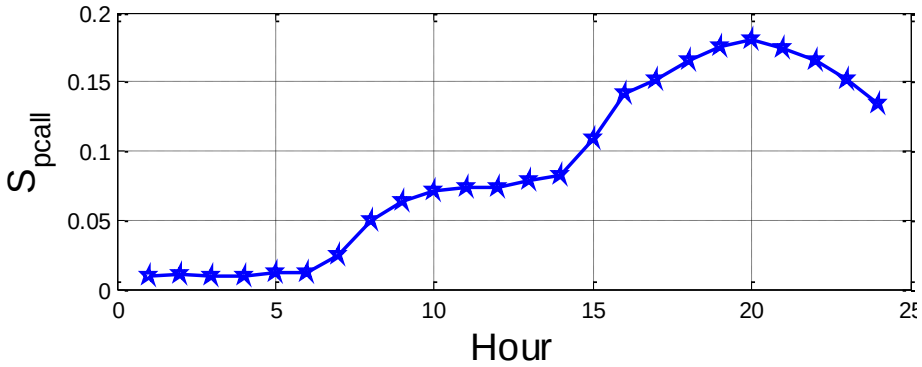



شکل۵-۷: سناریوی قیمت بازار ذخیره چرخان

بخش دوم درآمد، تولید انرژی است. نهاد گردهم‌آورنده در صورت فراخوان شدن، هزینه انرژی پیشنهادی خود را به قیمت لحظه‌ای انرژی، دریافت می‌کند. این بخش به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$Income_2 = \sum BidAgg \,.\, \lambda_{spt} \,.\, S_{pcall} \qquad (۳-۵)$$

که در آن $S_{pcall}$، سناریوی احتمال فراخوانی شدن نهاد از سوی ISO بوده و به صورت زیر فرض شده است.




شکل۵-۸: سناریوی احتمال فراخوانی شدن نهاد گردهم‌آورنده

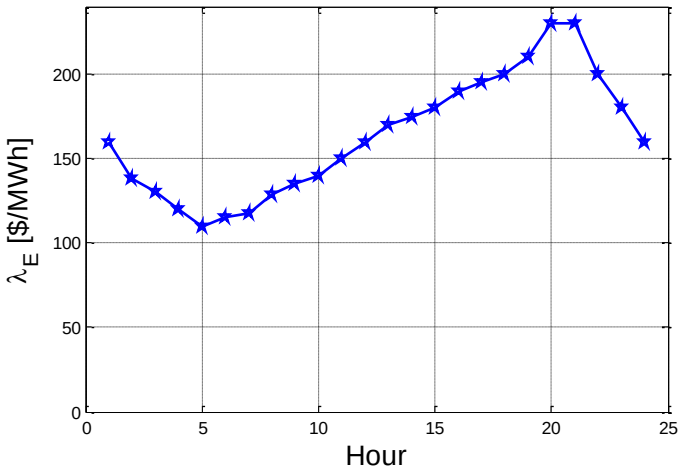
$\lambda_{spt}$ نیز قیمت لحظه‌ای بازار انرژی است که با مقادیر تصادفی $\mu$ و $\gamma$ و با توجه به سناریوی قیمت انرژی، می‌تواند به صورت زیر تعیین شود [۷۵]:

$$\lambda_{spt} = \begin{cases} (1+\gamma).\lambda_E(t), & peak\ hour \\ (1+\mu).\lambda_E(t), & off\ \ peak\ hour \end{cases} \qquad (۴-۵)$$

$$-0.1 \le \mu \le 0.1$$

$$0 \le \gamma \le 0.25$$

که در آن $\lambda_E$ سناریوی قیمت بازار انرژی به صورت زیر می‌باشد.




شکل۵-۹: سناریوی قیمت بازار انرژی

بخش سوم درآمد نهاد گردهم‌آورنده، هزینه دریافتی از خودروها بابت شارژ باتری آنها با رابطه زیر می‌باشد:

$$Income_3 = \sum \lambda_{ch1}.E_{G2V}(i).U(i) \qquad (۵-۵)$$

که در آن $\lambda_{ch1}$ قیمت هر کیلووات ساعت شارژ، $E_{G2V}(i)$ انرژی مصرفی هر خودرو در فرآیند شارژ و $U(i)$ ضریبی است با مقدار صفر برای خودروهایی که قید حداقل مدت زمان اتصال را رعایت کرده باشند و مقدار یک برای خودروهایی که این قید را رعایت نکرده‌اند. به عبارت دیگر هزینه شارژ از خودروهایی که بیشتر از زمان مشخصی در شبکه باقی بمانند، دریافت نمی‌شود. در واقع نهاد گردهم‌آورنده قصد دارد با این روش هزینه فرسودگی ناشی از شارژ و دشارژ متوالی باتری خودروها که به دلیل مشارکت آنها در سرویس‌های خدمات جانبی ایجاد می‌شود را به مالکان آنها بپردازد. هزینه

انرژی مصرفی جهت شارژ معمول باتری‌ها و انرژی اضافی در صورت فراخوانی از سوی ISO نیز بخش‌های بعدی تابع سود نهاد گردهم‌آورنده را تشکیل می‌دهد که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$Cost_1 = \sum chR.cap.\lambda_E.Nch \qquad (۶-۵)$$

$$Cost_2 = \sum BidAgg.\lambda_E.S_{pcall} \qquad (۷-۵)$$

که در آن $chR$ نرخ شارژ باتری بر حسب پریونیت بر ساعت، $cap$ ظرفیت باتری خودروها بر حسب کیلووات ساعت و $Nch$ تعداد خودروهای در حال شارژ در هر ساعت می‌باشد.

نهاد گردهم‌آورنده باید برنامه مشخص و بهینه‌ای برای خرید ساعتی انرژی مورد نیاز خود از بازار و نیز پیشنهادات ساعتی به بازار ذخیره چرخان داشته باشد. این برنامه باید علاوه بر رعایت قید تامین انرژی مورد نیاز جهت شارژ خودروها و نیز امکان تولید انرژی پیشنهادی در صورت فراخوانی شدن، سود نهایی نهاد گردهم‌آورنده را نیز که با معادله ۵-۱ بیان شده است، ماکزیمم نماید.

## ۵-۷. شبیه‌سازی و بیان نتایج

به منظور شبیه‌سازی برنامه و بهینه‌سازی مساله خودبرنامه‌ریزی از الگوریتم ژنتیک[1] استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی براساس سیر تکامل تدریجی بیولوژیکی است. بویژه هنگامی‌که مساله بهینه‌سازی دارای نقاط ماکزیمم یا می‌نیمم محلی[2] باشد، معمولا الگوریتم ژنتیک بهترین روش برای تمایز جواب کلی[3] و جواب‌های محلی است. در این روش، جمعیتی از افراد برای مساله انتخاب شده و به صورت تکراری تصحیح می‌شوند. هر فرد جامعه یک ژن نامیده می‌شود و آرایه‌ای از متغیرهای مساله یا همان کروموزوم‌ها است. در هر مرحله، با تولید نسل جدید، برخی از افراد جامعه به جواب‌های واقعی مساله نزدیکتر می‌شوند. الگوریتم کلی این روش در

[1] Genetic Algorithm
[2] Local Minimum
[3] Global Minimum

فلوچارت شکل ۵-۱۰ خلاصه شده است. همگرائی این روش تا حد زیادی به استراتژی تولید مثل بستگی دارد که به طور کلی تابع سه روش عمده می‌باشد:

*الف)* ترکیب ژن‌ها[1]: تعداد زیادی از فرزندان هر نسل از ترکیب ژنتیکی والدین تولید می‌شوند. در این روش، هر فرزند یا ژن جدید با انتخاب کروموزوم‌های ویژه‌ای از دو ژن دیگر تولید می‌شود. چگونگی انتخاب کروموزوم‌های والدین نیز تابع قوانین ویژه و مشخصی است.

ب) فرزندان نمونه[2]: در هر مرحله، درصد مشخصی از افراد جامعه که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را دارند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و بدون تغییر به مرحله بعد می‌روند. این شیوه تولید، تاثیر محسوسی بر سرعت همگرایی الگوریتم دارد.

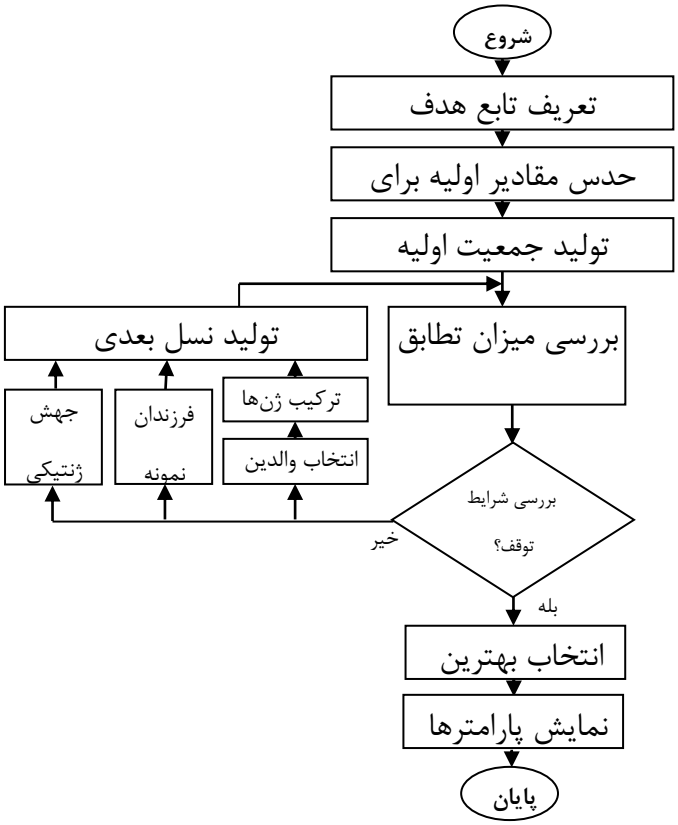
ج) جهش ژنتیکی[3]: تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های یک ژن منجر به تولید یک ژن جهش یافته به عنوان فرزندی در مرحله بعدی می‌شود. بدین ترتیب طیف وسیع‌تری از جواب‌های ممکن مساله بررسی می‌شوند.

شرایط ویژه‌ای برای توقف این الگوریتم مشخص می‌شود که در مسائل مختلف، متفاوت است، اما عدم تجاوز تغییرات پارامترهای مساله از محدوده‌ای مشخص پس از طی تعداد مشخصی از مراحل، شرط رایج برای توقف الگوریتم در اغلب مسائل می‌باشد.

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر الگوریتم ژنتیک، تعداد افراد جامعه است. هرچه اندازه جمعیت بیشتر باشد، سرعت پیشرفت الگوریتم کاهش یافته اما طیف وسیع‌تری از پاسخ‌ها بررسی می‌شوند. بطور معمول، اندازه جمعیت، ده برابر تعداد متغیرهای مساله انتخاب می‌شود. جامعه فرض شده برای این مساله شامل ۲۰۰ فرد است. جمعیت اولیه نیز با یک توزیع تصادفی یکنواخت در بازه (۱و۰) انتخاب می‌شود. چگونگی ترکیب ژنتیکی با تولید یک بردار تصادفی باینری مشخص می‌شود. این بردار دارای

[1] Crossover
[2] Elite Children
[3] Mutation

بعد برابر با افراد جامعه بوده و از اعداد تصادفی باینری تشکیل شده است. هنگامی‌که یک عضو این بردار صفر باشد، کروموزومی از فرد اول انتخاب می‌شود و هنگامی‌که این عضو یک باشد، کروموزوم از فرد دوم انتخاب می‌شود. این کروموزوم‌ها ترکیب شده و فرزندی را برای نسل بعدی تولید می‌کنند. در این قسمت فرزندان یا ژن، هر یک از متغیرهای مساله می‌باشد که شامل پیشنهادهای ساعتی انرژی در یک دوره بیست و چهار ساعته، خرید ساعتی انرژی و قیمت هر کیلووات ساعت شارژ است.لذا کروموزوم‌ها نیز بردارهای ۴۹ تایی متشکل از متغیرهای مذکور می‌باشند.




شکل۵-۱۰: الگوریتم ژنتیک

در هر مرحله از تولید نسل، ۳٪ از افراد جامعه که بیشترین میزان تطابق را داشته باشند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و به مرحله بعد می‌روند. جهش ژنتیکی با افزودن اعداد تصادفی به کروموزوم‌های ۲٪ از افراد جامعه انجام می‌شود. این اعداد تصادفی توسط یک تابع توزیع نرمال استاندارد تولید می‌شوند. واریانس این تابع در مرحله اول، یک است و به صورت خطی در هر مرحله از اجرای الگوریتم کاهش می‌یابد. برای رسیدن به پاسخ دقیق‌تر، مقدار تلورانس مجاز در تغییرات تابع

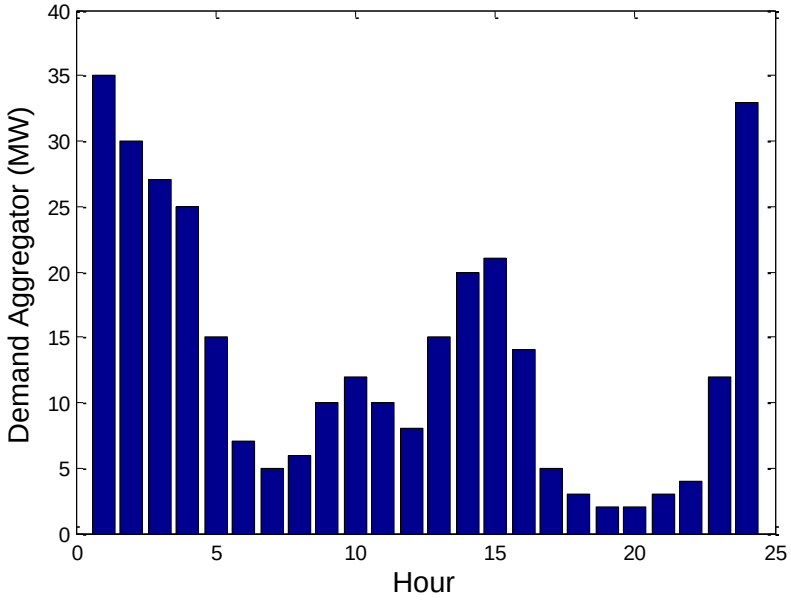
هدف برابر 1e-10 انتخاب شده که عدد بسیار کوچکی برای این کمیت می‌باشد. انتخاب این مقدار کوچک برای تلورانس مجاز، باعث طولانی شدن مراحل الگوریتم شده اما به جواب دقیق‌تری می‌انجامد. اصولا الگوریتم ژنتیک دارای پاسخ‌های متفاوت در هر اجرا است. زیرا بسیاری از مراحل این روش مانند تعیین جمعیت اولیه، ترکیب ژنتیکی، جهش ژنتیکی و ... همگی درگیر توابع تصادفی هستند.

مقادیر پارامترهای ثابت مساله در جدول ۵-۲ نشان داده شده است. زمان اتصال و قطع خودروها و میزان شارژ اولیه آنها هنگام اتصال نیز از دیگر پارامترهای مساله است که با توابع تصادفی مشخصی تولید می‌شوند.

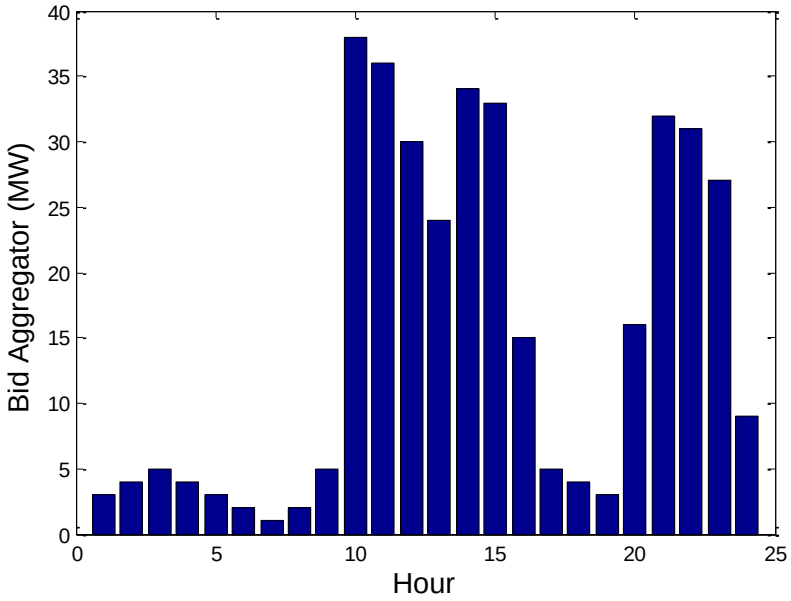
تعداد متغیرهای نسبتا زیاد در این مساله و قیود غیرخطی باعث دشواری‌هایی در دستیابی به جواب بهینه می‌شود. لذا لحاظ نمودن پارامترهای ویژه‌ای در الگوریتم ژنتیک ضروری می‌باشد. در نهایت پس از اجرای برنامه، مقادیر بهینه برای پیشنهادهای ساعتی انرژی و خرید انرژی به صورت نشان داده شده در شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ تعیین می‌شوند.

جدول۵-۲: پارامترهای ثابت مساله بهینه‌سازی

| پارامتر | مقدار | توصیف |
|---|---|---|
| $Nch$ | 4000 | تعداد کل خودروها |
| $Cap$ | $50^{\text{kWh}}$ | ظرفیت باتری هر خودرو |
| $chR$ | $0.2^{\text{pu/h}}$ | نرخ شارژ باتری |
| $Tc_{\min}$ | $5^{\text{h}}$ | حداقل زمان اتصال به شبکه |
| $\lambda ch_2$ | $225^{\$}$ | قیمت شارژ نهاد دوم |



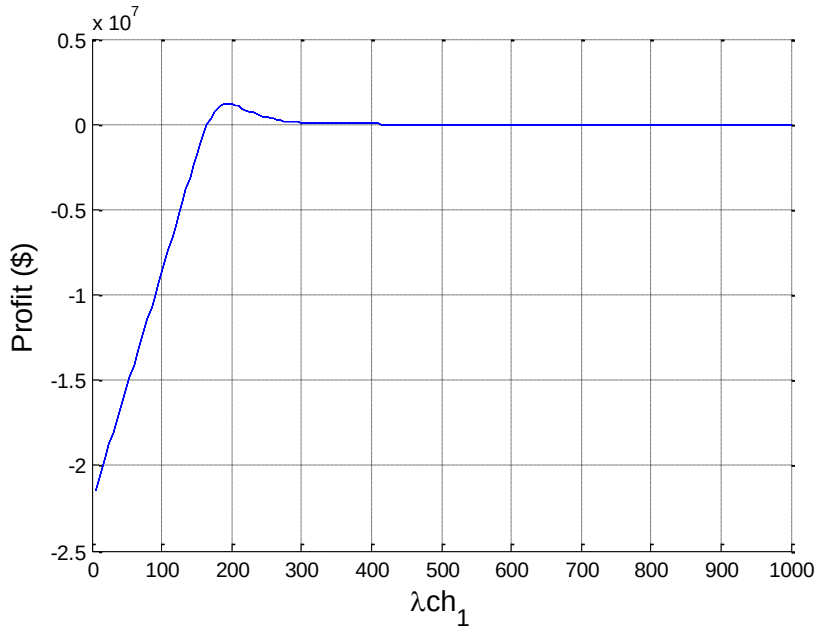

شکل۵-۱۱: تقاضای نهاد گردهم‌آورنده اول در بازار انرژی



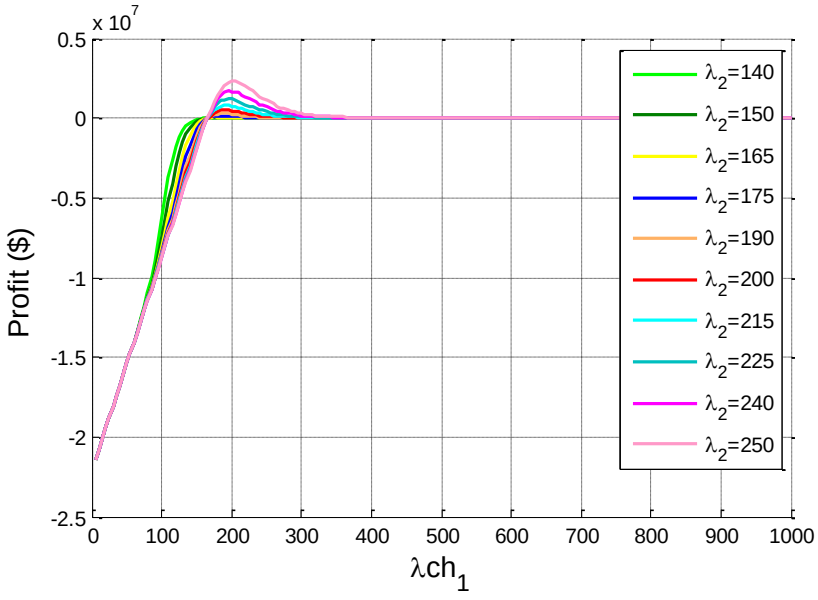

شکل۵-۱۲: پیشنهاد نهاد گردهم‌آورنده اول به بازار ذخیره چرخان

مقدار بهینه قیمت شارژ نیز برابر $\lambda_{ch1}$ =۱۸۰/۴۵$ می‌باشد. با توجه به قیمت شارژ نهاد دوم، درصد بهینه خودروهای جذب شده از کل بازار نیز از روی نمودار شکل ۵-۵ برابر ۸۹/۹٪ است. این موضوع در شکل زیر نیز مشهود است. این شکل میزان سود نهاد اول بر حسب تغییرات $\lambda_{ch1}$ و با فرض

رعایت قیود مساله را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج فوق بدیهی‌ست میزان سود نهاد اول و برنامه‌ریزی بهینه آن تابعی از تصمیمات نهاد دوم می‌باشد. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.



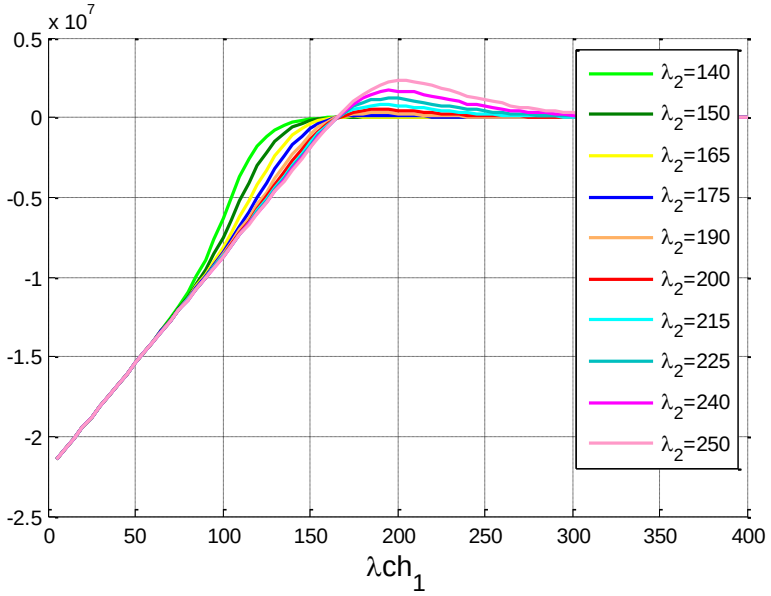

شکل۵-۱۳: سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت شارژ




شکل۵-۱۴: تغییرات سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت‌های شارژ نهاد دوم

این شکل میزان سود نهاد اول بر حسب تغییرات $\lambda_{ch1}$ و به ازای مقادیر مختلف $\lambda_{ch2}$ را نشان می‌دهد. همانگونه که شکل فوق نشان می‌دهد چنانچه نهاد دوم قیمت شارژ خود را افزایش دهد

امکان کسب سود بیشتری را به نهاد اول می‌دهد. البته کاهش بیش از حد این قیمت باعث خواهد شد تا سود نهاد اول در هر شرایطی منفی شود. اما نکته قابل توجه در این نمودار اینست که همواره سود ماکزیمم نهاد اول در حالتی اتفاق می‌افتد که ۸۹/۹٪ کل خودروها توسط این نهاد جذب شوند. توجه به این رقم ثابت و شیب نسبتا زیاد نمودار شکل فوق لزوم در نظر گرفتن رفتار نهاد دوم در برنامه‌ریزی بهینه را نشان می‌دهد. شکل زیر نمودار سود را به صورت شفاف‌تر نشان می‌دهد.




شکل۵-۱۵: تغییرات سود نهاد گردهم‌آورنده اول بر حسب قیمت‌های شارژ نهاد دوم بصورت واضح‌تر

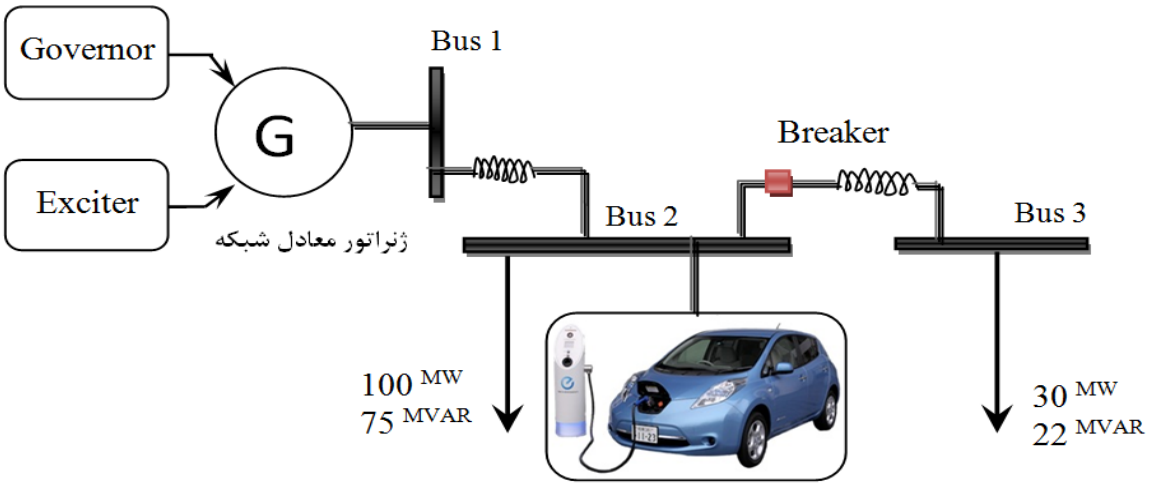
## ۵-۸. تاثیر تامین ذخیره چرخان با V2G در کنترل فرکانس شبکه

در بخش‌های قبلی شرایط و موضوعات مرتبط با مشارکت خودروهای برقی در بازار ذخیره چرخان از دیدگاه نهاد گردهم‌آورنده مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است که ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم را از نیروگاه‌های با پاسخ سریع نیز می‌توان تامین کرد اما چنانچه این نیاز توسط V2Gها تامین شود، در کنترل فرکانس شبکه نیز تاثیرگذار خواهد بود. در این بخش به بررسی این تاثیرات پرداخته می‌شود.

همانگونه که در فصل‌های قبلی ذکر شد خودروهای برقی دارای پاسخ دینامیکی بسیار سریع برای تغییرات توان خروجی می‌باشند. خودروهای برقی می‌توانند در زمانی در حدود چند میلی‌ثانیه به حداکثر توان خود برسند. این زمان بسیار کمتر از زمان لازم برای رسیدن به حداکثر توان حتی در

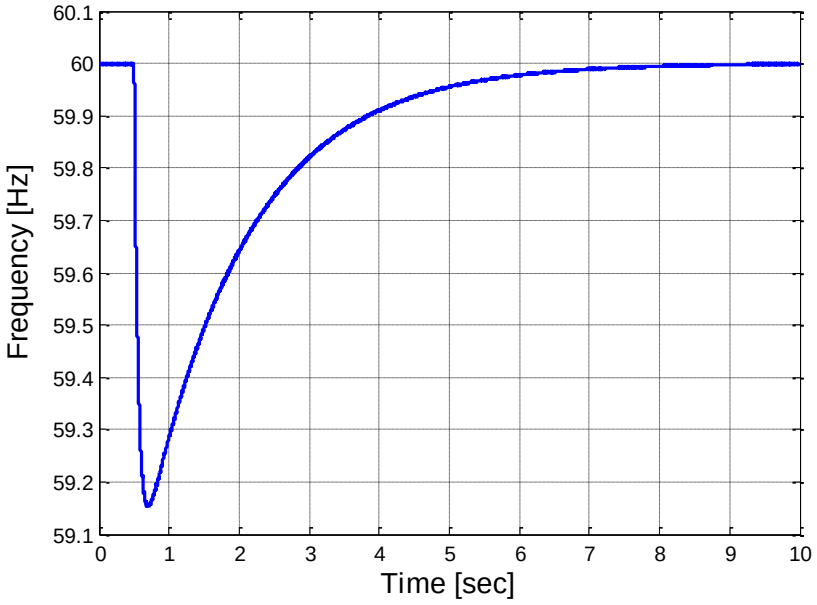
سریع‌ترین نیروگاه‌های شبکه می‌باشد. می‌توان فرض کرد کل ذخیره چرخان مورد نیاز شبکه توسط یک نهاد گردهم‌آورنده و تعدادی نیروگاه‌های با پاسخ سریع تامین شود. درپی بروز یک اغتشاش ناگذرا مانند اتصال یک بار بزرگ در شبکه، از یک سو سیستم‌های کنترلی اقدام به تثبیت فرکانس خواهند نمود و از سوی دیگر ISO اقدام به فراخوانی عوامل تامین ذخیره چرخان می‌کند. در این هنگام تمامی عوامل تامین ذخیره چرخان اقدام به افزایش توان خروجی خود خواهند نمود. در این میان، نهاد گردهم‌آورنده بسیار سریع‌تر از سایر نیروگاه‌ها، توان پیشنهادی خود را به شبکه تحویل خواهد داد. زمان رسیدن V2Gها به حداکثر توان خود آنقدر سریع است که حتی هنوز فرکانس شبکه به حالت پایدار نرسیده است. بنابراین فراخوانی V2G برای تامین ذخیره چرخان می‌تواند بر عملکرد کنترل‌کننده‌های فرکانس و نوسانات فرکانس شبکه تاثیرگذار باشد. در اینجا با شبیه‌سازی یک سیستم سه باسه در محیط نرم‌افزار MATLAB به بررسی این پدیده پرداخته شده است.

شبکه مورد بررسی دارای یک ژنراتور مجهز به کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس در باس مبنای سیستم می‌باشد. خودروهای برقی متصل به شبکه به صورت یکجا در باس ۲ فرض شده و بارهای سیستم در باس‌های ۲ و ۳ قرار گرفته است. شماتیک کلی این سیستم در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد.




شکل۵-۱۶: شماتیک کلی سیستم سه باسه تحت مطالعه

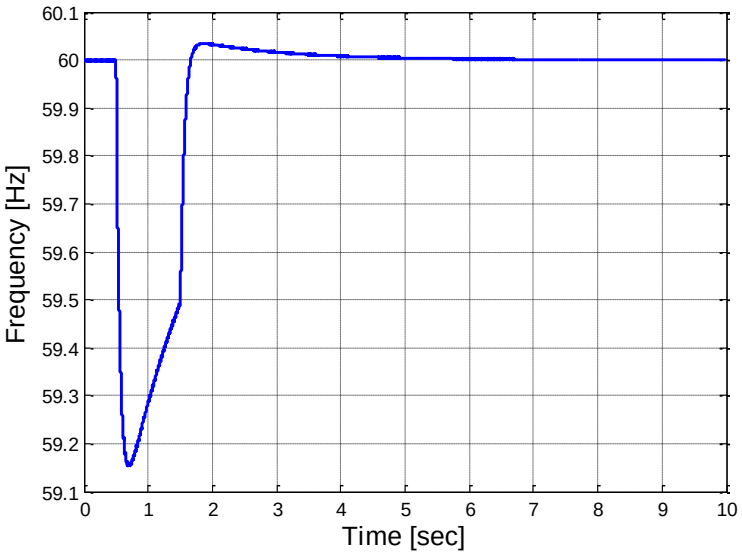
ذخیره چرخان مورد نیاز این سیستم در ساعات مختلف، متغیر بوده و با سهم متفاوتی در هر ساعت از خودروهای برقی و دیگر تولیدکنندگان تامین می‌شود. سهم خودروهای برقی در تامین ذخیره چرخان در ساعات مختلف در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. به عنوان نمونه مطابق این شکل مجموعه V2Gها در ساعت ۱۷ آمادگی تولید حدودا $۵^{MW}$ توان برای تزریق به شبکه را دارد. فرض می‌شود در این ساعت توانی به اندازه $۳۰^{MW}$ و $۲۲^{MVAR}$ با عملکرد کلید بین باس ۲ و ۳ مطابق شکل ۵-۱۵ به شبکه متصل شود. اتصال این بار باعث کاهش لحظه‌ای فرکانس شبکه خواهد شد. در این هنگام سیستم کنترل فرکانس ژنراتور وارد عمل شده و فرکانس سیستم را به مقدار نامی آن باز خواهد گرداند. نتایج شبیه‌سازی این رخداد در MATLAB مطابق شکل ۵-۱۷می‌باشد.




شکل۵-۱۷: نوسان فرکانس سیستم سه باسه در اثر اتصال یک بار

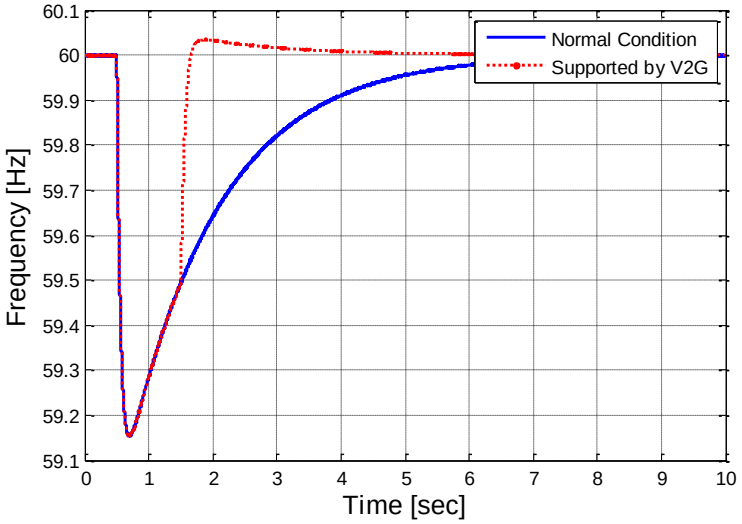
در صورتی که تمامی تامین کنندگان ذخیره چرخان از نوع نیروگاه‌های با پاسخ سریع باشند، در چند ثانیه اول حالت گذرایی فرکانس، توان قابل توجهی به شبکه اضافه نشده و دینامیک کنترل فرکانس مطابق شکل فوق خواهد بود. اما اگر یکی از تامین کننده‌های ذخیره چرخان از نوع V2G باشد، به محض فراخوانی از سوی ISO، توان محسوسی به شبکه اضافه شده و در دینامیک کنترل فرکانس تاثیرگذار خواهد بود. با فرض آنکه سیگنال فرمان فراخوانی از سوی ISO، حدودا ۱ ثانیه پس از بروز

خطا صادر شده و V2Gها تقریبا توان $5^{MW}$ را به صورت تقریبا آنی به باس ۲ شبکه تزریق نمایند، نوسانات فرکانس مطابق شکل زیر خواهد بود:




شکل۵-۱۸: نوسانات فرکانس سیستم در حضور V2G با هدف تامین رزرو چرخان

سایر نیروگاه‌های تامین کننده ذخیره چرخان نیز با دریافت فرمان فراخوانی اقدام به افزایش تولید می‌کنند اما زمان تاخیر این نیروگاه‌ها در رسیدن به سطح تولید مطلوب بسیار بیشتر از دوره گذرایی فرکانس می‌باشد. در شکل زیر نوسانات فرکانس سیستم پس از اتصال بار مذکور در دو حالت مختلف فوق‌الذکر مقایسه شده است.




شکل۵-۱۹: تاثیر عملکرد V2G در کنترل فرکانس شبکه با هدف تامین رزرو چرخان

این شکل نشان می‌دهد سرعت پاسخ بسیار بالای خودروهای برقی باعث می‌شود تا هنگامی‌که این خودروها به عنوان تامین کننده ذخیره چرخان شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند، باز هم در کنترل فرکانس سیستم تاثیر مثبت داشته باشند. لازم به ذکر است این ویژگی، علاوه بر قابلیت مشارکت V2Gها به صورت مستقیم در کنترل فرکانس شبکه می‌باشد.

# فصل ششم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱. نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، ابتدا قابلیت مشارکت خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به این منظور یک شبکه قدرت کوچک در محیط MATLAB شبیه‌سازی می‌شود. برای ارزیابی تاثیر خودروهای برقی در کنترل فرکانس شبکه، سه سناریوی مختلف شامل اتصال یک بار بزرگ و قطع یک بار بزرگ و نیز اتصال کوتاه سه فاز متقارن در یکی از باس‌های سیستم در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که در زمان مشارکت V2G، نوسانات فرکانس شبکه در بازه زمانی کوتاهتر و با درصد فراجهش کمتر میرا می‌شوند. این مساله به طور عمده ناشی از سرعت پاسخ بسیار سریع V2Gها نسبت به سایر نیروگاه‌های معمول شبکه می‌باشد. بررسی انجام شده در شبکه نمونه نشان می‌دهد چنانچه درصد بالایی از خودروهای درونسوز فعلی با خودروهای برقی جایگزین شده و الگوی استفاده از خودروها کماکان بدون تغییر بماند، انرژی کل این خودروها برای مشارکت در کنترل فرکانس شبکه، قابل توجه خواهد بود. به علاوه سرعت پاسخ بسیار بالای این خودروها قابلیت‌های ویژه آنها را در کنترل فرکانس شبکه نشان می‌دهد.

در مرحله بعدی امکان پشتیبانی شبکه توسط خودروهای برقی به صورت عملی‌تر در یک محیط تجدید ساختار یافته مورد مطالعه قرار گرفت. در این محیط،خدماتی از قبیل کنترل فرکانس تحت عنوان سرویس‌های خدمات جانبی شناخته شده و دارای بازارهای مجزایی می‌باشند. برنامه‌ریزی بهینه نهاد گردهم‌آورنده برای شرکت در این بازارها و کسب سود ماکزیمم از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مرحله، بازار ذخیره چرخان به لحاظ برخورداری از پارامترها و متغیرهای برنامه‌ریزی بیشتر، به عنوان بازار هدف انتخاب شده است. لذا نهاد گردهم‌آورنده به دنبال یک الگوریتم خودبرنامه‌ریزی می‌باشد تا خطای ناشی از پیش‌بینی پارامترهای غیر قطعی مساله، هزینه و درآمدهای خود را مدلسازی کرده و بتواند با بهینه‌سازی توان پیشنهادی به بازار و تقاضای ساعتی خرید انرژی، علاوه بر تامین شارژ مورد نیاز خودروهای تحت پوشش خود، سود ماکزیمم از بازار کسب کند.

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در سود نهایی هزینه دریافتی بابت شارژ خودروها می‌باشد. در یک محیط رقابتی، این هزینه در رفتار صاحبان خودروها برای گرایش به یکی از نهادها موثر است. در مطالعه انجام شده، هزینه شارژ دریافتی از خودروها به گونه‌ای تعیین شد تا همواره درصد نسبتا ثابتی از خودروهای شبکه جذب شوند. این پارامتر با تغییر رفتار نهاد رقیب ثابت می‌ماند. در واقع می‌توان اینطور نتیجه‌گیری کرد که برای کسب سود ماکزیمم از بازار ذخیره چرخان، نهاد گردهم آورنده باید بدون توجه به قیمت انرژی و رفتار نهاد دوم، هزینه دریافتی از خودروها بابت شارژ باتری آنها را به گونه‌ای تنظیم نماید که این درصد ثابت از خودروهای شبکه جذب این نهاد شوند. این هزینه تابعی از رفتار غیرخطی صاحبان خودرو می‌باشد و در مطالعه انجام شده، برابر ۸۰/۲٪ قیمت نهاد رقیب محاسبه شد.

از سوی دیگر سرعت بسیار بالای خودروهای برقی شرکت کننده در بازار ذخیره چرخان در هنگام فراخوانی از سوی ISO، بر تنظیم فرکانس شبکه نیز موثر می‌باشد. شبیه‌سازی انجام شده در این حالت نشان داد خودروهای برقی می‌توانند به محض فراخوانی از سوی ISO، وارد شبکه شده و خطای حالت ماندگار فرکانس را در زمانی نسبتا کمتر از زمان مورد انتظار صفر نمایند. از این جهت، تامین ذخیره چرخان شبکه از خودروهای برقی دارای مزایایی نسبت به تامین این نیاز از واحدهای تولیدی معمول شبکه می‌باشد.

## ۶-۲. پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار

با توجه به گسترش روزافزون استعمال خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه و لزوم برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از این منبع ذخیره‌ساز انرژی، در این قسمت به ارائه چند پیشنهاد پرداخته می‌شود:

۱. در این پایان‌نامه خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی فقط به منظور شرکت در بازار ذخیره چرخان بررسی شد. پیشنهاد می‌شود خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده همزمان

برای شرکت در بازارهای دیگری از قبیل بازار انرژی، بازار تنظیم و بازار توان راکتیو نیز بررسی شود.

۲. همانطور که قبلا نیز بیان شد نهاد گردهم‌آورنده به دلیل مسائل اجتماعی و اقتصادی مربوط به رفتار صاحبان خودروهای برقی، قادر نیست در برخی از ساعات شبانه‌روز در انواع بازارها شرکت کند، بنابراین پیشنهاد می‌شود خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده خودروهای برقی با همکاری سایر منابع انرژی محدود نظیر نیروگاه‌های بادی، واحدهای تولید پراکنده و ... بررسی شود.

۳. پس از بهینه‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی نهاد گردهم‌آورنده مقادیر بهینه تقاضا و پیشنهادهای ساعتی مشخص می‌شود. علاوه بر آن، نمودار سود نهاد گردهم‌آورنده نیز قابل مشاهده است. همواره سود ماکزیمم نهاد اول در یک حالتی اتفاق می‌افتد که درصد مشخصی از کل خودروها توسط این نهاد جذب شوند. توجه به این رقم ثابت و شیب نسبتا زیاد نمودار سود لزوم در نظر گرفتن رفتار نهاد دوم در برنامه‌ریزی بهینه را نشان می‌دهد. البته طبیعتا نهاد دوم نیز درصدد کسب سود ماکزیمم برآمده و به درصد اندک باقیمانده خودروها اکتفا نخواهد کرد. برنامه‌ریزی بهینه نهاد گردهم‌آورنده در این شرایط نیازمند استفاده از الگوریتم‌های پیچیده‌تری می‌باشد که در ادامه این تحقیق قابل بررسی است.

# مراجع


[1] Smith W. J., (**2010**), "Plug In Hybrid Electric Vehicles a low carbon Solution for Ireland" **Energy Policy**, pp. **1485-1499**.

[2] Song Y., Yang X. and Lu Z., (2010),"Integration of Plug-in Hybrid and Electric Vehicles: Experience from China ", Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6.

[3] Kristien l.-N., Koen V. R. and Johan D., (2007),"The Consumption of Electrical Energy of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Belgium ", EET-2007 European Ele-Drive, Brussels, Belgium.

[4] "International Energy Agency Report. Technology road map: Electric and plug-in hybrid electric vehicles.," 2009.

[5] Inage S.-I., "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment " , 2010.

[6] Guille C. and Gross G., (2008),"Design of a Conceptual Framework for the V2G Implementation", IEEE Energy2030, Atlanta, GA USA.

[7] Online available: http://www.futurelab.net

[8] Moura F. and Schrattenholzer L., "Driving energy system transformation with vehicle-to-grid power," International Institute for Applied Systems Analysis, 2006.

[9] Kempton W. and Tomi´c J., (**2005**), "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue" **Journal of Power Sources**, pp. **268-279**.

[10] Yiyun T., Can L., Lin C. and Lin L., (**2011**), "Research on Vehicle-to-grid Technology" pp. **1013-1016**.

[11] MacKenzie J. J., (**1994**),"**The Keys to the Car: Electric and Hydrogen Vehicles for the 21st Century**," Baltimore: World Resources Institute.

[12] Karnama A., (2009), PhD. thesis. "Analysis of Integration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in The Distribution Grid".

[13] Guille C. and Gross G., (**2009**), "A conceptual framework for the vehicle-to-grid V2G implementation" ***Energy Policy***, **37**, **11**, pp. **4379-4390**.

[14] Kempton W. and Tomic J., (**2005**), "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy" **Journal of Power Sources 144**, **1**, pp. **268-279**.

[15] Freige M. d., Joos G. and Dubois M., (2011),"Energy Management & Scheduling in a Fast Charging Station for PHEV Batteries", Power and Energy Society General Meeting Dept. of Electr., Eng., McGill Univ., Montreal, QC, Canada.

[16] Clement-Nyns K., Haesen E. and Driesen J., (**2011**), "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid" **Electric Power Systems Resaerch**, **81**, **1**, pp. **185-192**.

[17] Zhong X., et al., (2009),"Assessment of Vehicle to Grid Power as Power System Support", Universities Power Engineering Conference (UPEC).

[18] Kempton W., et al., "Vehicle to grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California," UC Davis Institute for Transportation Studies, 2001.
[19] Tomic J. and Kempton W., (**2007**), "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support" **J. Power Sources**, **168**, **2**, pp. **459-468**.
[20] Guille C., (2007), Master of Science thesis. "A Conceptual Framework for the Vehicle-to-Grid (V2G) Implementation", University of Illinois university.
[21] Mullen S. K., (2009), PhD. thesis. "Plug-In Hybrid Electric Vehicles as a Source of Distributed Frequency Regulation ", Minnesota university.
[22] http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster, "Tesla Roadster", Online available: http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster, 2012.
[23] Pillai J. R., (2010), PhD. thesis. "Electric Vehicle Based Battery Storages For Large Scale Wind Power Integration in Denmark ", Aalborg University.
[24] Chan C. C., (2007 ),"The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles", pp.704 - 718.
[25] "US Department of Transportation ", Online available: http://www.bts.gov/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_surve, 2001.
[26] Wu Q., et al., (2010),"Driving pattern analysis for electric vehicle (EV) grid integration study", Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 1-6, Gothenberg.
[27] Gage T. B., "Final report: Development and evaluation of a plug-in HEV with vehicle-to-grid power flow," AC Propulsion, Inc, 2003.
[28] Kundur P., (**1994**),"**Power system stability and control** " New York: McGraw-Hill.
[29] Saadat H., (**2001**),"**Power system Analysis**," McGraw-Hill.
[30] Wu J., Ekanayake J. and Samarakoon K., (2011),"Frequency Response From Electric Vehicles", The first international conference on smart grids, Green Cmmunications and IT energy-aware technologies.
[31] Karrari M., (**2004**),"**Power Systems Dynamics and Control**," Tehran Polytechnic.
[32] "Reliability Considerations from the Inegration of Smart Grid," 2010.
[33] Kempton W. and S. L., (**1997**), "Electric vehicles as a new power source for electric utilities" **Transp. Res. D**, **2**, **3**, pp. **157-175**.
[34] Kempton W. and Kubo T., (**2000**), "Electric-drive vehicles for peak power in Japan" **Energy Policy**, **28**, pp. **9-18**.
[35] Brooks A., "Presentation at the EVAA," 2001.
[36] Kempton W., "Vehicle to grid power analysis seminar NREL," 2005.
[37] Kempton W., (**2007**), "Vehicle to grid power analysis seminar NREL" pp.
[38] Kempton W., et al., "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System " MAGIC Consortium, 2008.
[39] Hutson C., Venayagamoorthy G. K. and Corzine K. A., (2008),"Intelligent Scheduling of Hybrid and Electric Vehicle Storage Capacity in a Parking

Lot for Profit Maximization in Grid Power Transactions", IEEE Energy 2030 Conference.

[40] Han S., Han S. H. and Sezaki K., (**2010**), "Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation " **IEEE Transaction on Smart Grid**, **1**, **1**, pp. **65-72**.

[41] Kristoffersen T. K., Capion K. and Meibom P., (**2011**), "Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment" **Journal of applied energy**, **88**, **5**, pp. **1940-1948**.

[42] Dallinger D., Krampe D. and Wietschel M., (**2011**), "Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic solution of mobility behavior" **IEEE Transaction on Smart Grid**, **2**, **2**, pp. **302-313**.

[43] Sortomme E. and El-sharkawi M. A., (**2012**), "Optimal Combined Bidding of Vehicle-to-Grid Ancillary Services" **IEEE Transaction on Smart Grid**, **3**, **1**.

[44] Han S., Han S. H. and Sezaki K., (**2011**), "Estimation of Achievable Power Capacity from Plug-in Electric Vehicles for V2G Frequency Rregulation: Case Studies for Market Participation" **IEEE Transaction on Smart Grid**, **2**, **4**, pp. **632-641**.

[45] Abolfazli M., Bahmani M. H., Afsharnia S. and Ghazizade M. S., (2011),"A probabilistic method to model PHEV for participation in electricity market", 19th Iranian Conference of Electrical Engineering (ICEE).

[46] Shafie-khah M., Parsa-moghaddam M., Sheikh-El-Eslami M. K. and Rahmani-Andebili M., (**2012**), "Modeling of interactions between market regulations and behavior of plug-in electric vehicle aggregators in a virtual power market environment" **Journal of Energy Policy**, **40**, **1**, pp. **139-150**.

[47] Chan C. C. and Chau K. T., (**2001**),"**Modern Electric Vehicle Technology**," Oxford, UK: Oxford Science Publications.

[48] Erdinc O., Vural B. and Uzonogly M., (**2009**), "A dynamic battery model considering the effects of temperature and capacity fading", International Conference on Clean Electrical Power.

[49] Liaw B.Y., Nagasubramanian G., Jungst R.G. and Doughty D.H., (**2004**), "Modelling of lithium-ion cells-A simple equivalent- circuit model approach", **Journal of Solid States Ionics**, pp. **835-839**

[50] Gao L., Liu S. and Dougal R. A., (**2002**), "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation", **IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies**, pp. **495-505.**

[51] Andrea D., "V2G Becomes Reality", 2010.

[52] Charles A., Falcone, (1999), "Transmission In Transition: Bringing Power To Market", IEEE Power Engineering Review, 11-26, American Power Conference.

[53] Pirbazari A. M., (2010), "Ancillary Services Definitions, Markets and Practices in The World", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America.

[54] داوود منظور، امیرکاظم صفاکیش، "پیش بینی قیمت برق در بازاربرق رقابتی ایران با رویکرد مدلهای سری زمانی"، هفتمین همایش ملی انرژی، ۱۳۸۸.
[55] María N. S., (2010), Master of Science thesis. "Day-Ahead Electricity Market", Madrid university.
[56] Krischen D. S. and Strbak G., (**2004**), "**Fundamentals of Power System Economics**," John Wiley & Sons.
[57] E.Hrist and B.Kirby, "Creating competive markets for ancillary services," 1996.
[58] Prada R. B., (2002),"Possible Design of The Brazilian Ancillary Service Market for Generation Reserves", Power System Management and Control, 414-419.
[59] Wood A. J. and Wollenberg B. F., (**1996**),"**Power generation, operation & control**," New York: Wiley.
[60] Kirby B. J., "Frequency Control Concerns In the North American Electric Power System," Oak Ridge National Laboratory, 2002.
[61] Kirby B. J., "Frequency Regulation Basics and Trends " Oak Ridge National Laboratory, 2004.
[62] Wen F. S. and David A. K., (**2001**), "A genetic algorithm based method for bidding strategy coordination in energy and spinning reserve markets", **International Journal of Artificial Intelligence in Engineering**, **15**, **1**, pp. **71-79**.
[63] Rashidi-Nejad M., Song Y. H. and Javidi-Dasht-Bayaz M. H., (2002),"Operating Reserve Provision in Deregulated Power Markets", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 1305-1310.
[64] "Demand response as ancillary services", Online available: http://www.energetics.com/madri/pdfs/whitepaper_121004.pdf., 2004.
[65] "PJM Manuals Generator operational requirements," 2012.
[66] Zhong J., (2003), PhD. thesis. "On some aspect of design of electric power ancillary service market", Chalmers University of Technology university.
[67] Jia X., Zhou M. and Li G., (2006),"Study on Conjectural Variation Based Bidding Strategy in Spinning Reserve Markets", Power System Technology.
[68] Shahidehpour M., Yamin H. and Li Z., (**2002**),"**Market Operations in Electric Power Systems**," John Wiley & Sons.
[69] تکتم شریفیان عطار و محمدحسین جاویدی دشت بیاض "ارائه یک روش جدید برای تصمیم‌گیری جهت شرکت واحدهای تولیدی در بازار رزرو از دیدگاه مالک با استفاده از محاسبه هزینه فرصت"، بیست و پنجمین کنفرانس بین والمللی برق، تهران.
[70] Stacke F. and Cuervo P., (2007),"Integrated Pool-Bilateral and Reserve Electricity Markets through Pay-as-Bid Pricing", Power Engineering Society General Meeting.
[71] Brooks A. N., "Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle," AC Propulsion. Inc, 2002.

[72] Brooks A. and Gage T., (2001),"Integration of electric drive vehicles with the electric power grid - a new value stream ", 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Berlin, Germany.

[73] Quinn C., Zimmerle D. and Bradley T. H., (**2010**), "The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services" **Journal of Power Sources**, **195**, **5**, pp. **1500-1509**.

[74] Wu D., Aliprantis D. C. and Ying L., (**2012**), "Load scheduling and dispatch for aggregators of plug-in electric vehicles" **IEEE Transanction on Smart Grid**, **3**, **1**.

[75] Haghighat H., Seifi H. and Kian A. R., (2008),"On the Self-Scheduling of a Power Producer in Uncertain Trading Environment", Electric Power Systems Research, 311-317.

## Abstract:

Nowadays, the electric vehicles (EVs) have gained the great attention due to the decrease of fossil fuel resources and increase of greenhouse gas emissions. Increasing the EVs in recent years provide a special opportunity to support the power network. In this regard the salient characteristics of EVs such as considerable energy storage, fast response, quite high EV availability and etc. are of a great importance. The EVs can be supposed as a provider of ancillary services such as frequency regulation, reactive power control and spinning reserve in modern power system. The ability of EVs to control the frequency of the system is investigated in this thesis. An intensive management of sparse EVs in the network and scheduling for using the extra charge of EV batteries are attractive issues to smart grid experts. Therefore an independent entity is offered to aggregate all EVs and manage them to present charging services in spinning reserve market. The aim of the aggregator of electric vehicles is gaining the maximum profit by self-scheduling to participate in the reserve market. The EVs are embedded in a three bus islanded power network and provide the auxiliary frequency control service after a typical disturbance. A MATLAB/Simulink based simulation confirms the ability of EVs to damp the frequency fluctuations with respect to providing spinning reserve.

**Key words:** Electric Vehicles, Frequency Control, Self-Scheduling of Aggregator, Spinning Reserve Market

Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

# The Effect of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Frequency Regulation in Smart Grids

**Sahar Ramezani**

Supervisor:

**Dr. Mahdi Banejad**

Advisor:

**Dr. AminHajizadeh**

February 2013