

مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با استفاده از کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک

سید حسین اجتهاد^۱، سعید خوبی آرانی^۲، ابوالفضل حلوائی نیاسر^{۳*}، امین حاجی زاده^۴

^۱ مربی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، ejtahed@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، s.khoobi@grad.kashanu.ac.ir

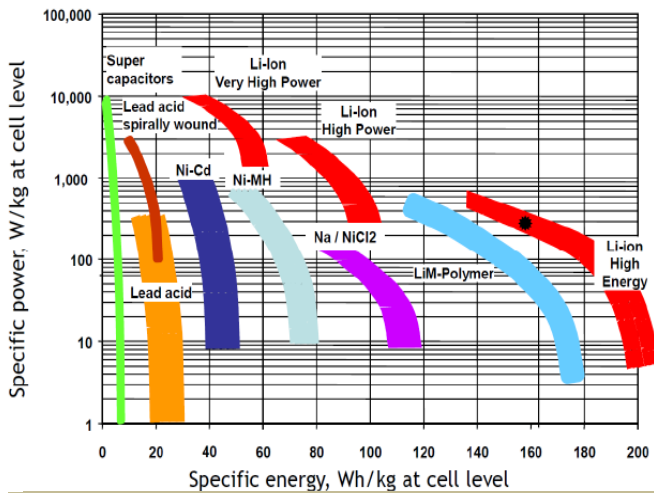
^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، halvaei@kashanu.ac.ir

^۴ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، dr.amin.hajizadeh@ieee.org

چکیده: در این مقاله، روشی نوین برای کنترل و مدیریت بهینه منابع توان در یک خودروی برقی دارای دو منبع تأمین انرژی شامل باتری و ابرخازن ارائه می‌شود. برای این منظور یک کنترل کننده غیرخطی بهینه بر مبنای سیستم فازی طراحی می‌شود. مهم‌ترین مرحله در طراحی سیستم فازی، انتخاب درست قوانین فازی و توابع عضویت است که در این مقاله، قوانین فازی و توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح تعیین می‌شوند. روش پیشنهادی همراه با دو روش فازی معمولی و کنترل گسسته دو وضعیت on/off بهینه روی سیکل استاندارد رانندگی شهری^۱ (EPA-UDDS) و با مدل خودروی برقی در محیط نرم‌افزار Advisor شبیه‌سازی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که میزان انرژی مصرفی خودروی برقی در سیکل رانندگی مورد نظر، با استفاده از کنترل کننده فازی بهینه، کاهش چشمگیری نسبت به کنترل کننده فازی معمولی و همچنین کنترل کننده گسسته on/off بهینه یافته است.

واژه‌های کلیدی: خودروی برقی، سیستم فازی، مدیریت توان، ذخیره‌ساز انرژی، الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح.

۱. مقدمه



شکل (۱): مقایسه توان و ظرفیت ابرخازن و انواع باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی [۶]

سرعت (شتاب مثبت) و ترمزی بازیاب (شتاب منفی) پایین است و در عوض ابرخازن‌ها با وجود ظرفیت ذخیره‌سازی پایین، توان تولید یا ذخیره انرژی بالایی دارند. استفاده توأم از این دو تجهیز در کنار یکدیگر، به عملکرد مورد نظر در خودروی برقی کمک زیادی می‌کند [۵]. در شکل (۱)، مشخصه‌های عملکردی ابرخازن و انواع مختلف باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی نمایش داده شده‌اند. با شراکت باتری و ابرخازن عملکردی نرم در شارژ و تخلیه باتری ایجاد می‌شود که بر عمر باتری می‌افزاید. توان بالای ابرخازن هم امکان بازیاب انرژی ترمزی را تا حداکثر مقدار ممکن فراهم می‌آورد.

به‌منظور کنترل توان در خودروهای برقی با چندین منبع ذخیره‌ساز انرژی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] عملکرد خودروی برقی با یک منبع توان (فقط باتری) با عملکرد آن در حالت وجود منابع مختلف توان را مطالعه کرده و یک روش کنترل فراکوشی (متاهیورستیک^۳) به‌کار برده و نتیجه گرفته است که وجود منابع چندگانه سبب افزایش بهره، برد و عملکرد بهتر خودرو می‌شود. در مرجع [۸] به‌منظور مدیریت توان در یک خودروی برقی با باتری و ابرخازن، یک فاکتور دینامیکی K به‌صورت نسبت توان گرفته‌شده از باتری به توان ابرخازن در نظر گرفته شده است. یک جدول مراجعه^۴ برای تعیین مقدار K برحسب حالت شارژ باتری‌ها ایجاد شده است. این روش ساده برای پیاده‌سازی بسیار ساده است، اما انتخاب ضریب K چندان ساده نبوده و ایجاد همین جدول مراجعه نیز نیازمند آزمایش‌های مختلفی است. در مرجع [۹] برای مدیریت توان در

علی‌رغم انجام تحقیق‌های وسیع برای افزایش بازده و بهینه‌سازی مصرف سوخت خودروهای احتراق داخلی، این خودروها هم‌اکنون به‌عنوان منبع عمده آلودگی هوا در مناطق شهری معرفی شده‌اند. علاوه بر مسئله آلودگی هوا، محدودیت منابع سوخت فسیلی، استفاده غیربهینه از سوخت در خودروهای احتراق داخلی را زیر سؤال برده است؛ از این رو صنعت حمل‌ونقل نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده سوخت به دنبال توسعه جایگزین مناسب است [۱]. استفاده از خودروهای با آلودگی کم یا آلودگی صفر اقدامی راهبردی به‌منظور کاهش آلودگی شهرهای بزرگ ناشی از مصرف سوخت است. استفاده از خودروهای برقی و ترکیبی^۱ (HEV) تلاشی در این راستاست [۲]. خوشبختانه استفاده از خودروهای برقی با پیشرفت در تکنولوژی پیل سوختی و همچنین تولید باتری‌های با ظرفیت بالا و حجم کم، جان تازه‌ای گرفته است و تقریباً تمامی شرکت‌های خودروسازی معتبر جهان، خودروهای با پیل سوختی^۲ (FCV) را به‌عنوان راه‌حل درازمدت و راهبردی صنعت خودروسازی در نظر گرفته‌اند [۳ و ۴]. همچنین خودروهای برقی با قابلیت شارژ سریع به‌دلیل آلودگی پایین و بازدهی بالا به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای جایگزینی خودروهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی پا به عرصه وجود گذاشته‌اند و پیشرفت‌های اخیر در صنعت تأسیسات شارژ این خودروها باعث شده است که مشکل مدیریت منابع انرژی و شارژ و تخلیه در این خودروها که بزرگ‌ترین مانع بر سر راه گسترش این خودروها بود نیز به‌تدریج رفع شود.

طراحی سیستم مدیریت توان یا انرژی و بهینه‌سازی عملکرد خودروی برقی با چندین منبع انرژی از مهم‌ترین مسائلی است که مد نظر محققان قرار گرفته است. استفاده هم‌زمان از چندین منبع برای مثال ابرخازن، پیل سوختی و پیل خورشیدی در کنار باتری، نه تنها باعث افزایش قابل ملاحظه بُرد خودروی الکتریکی می‌گردد، بلکه باعث کاهش تلفات، افزایش بهره، کاهش مصرف انرژی و عمر طولانی‌تر باتری می‌شود. در حال حاضر، استفاده هم‌زمان از باتری و ابرخازن به‌عنوان اجزای اساسی از یک خودروی الکتریکی کاملاً پذیرفته شده است و روند تحقیقاتی پیل سوختی نیز از آینده امیدوارکننده‌ای برای آن حکایت دارد، اما تجاری‌سازی خودروهای پیل سوختی و پیل خورشیدی نیازمند کار بیشتری است. باتری‌های کنونی ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی نسبتاً بالایی دارند، اما توان آن‌ها برای افزایش

3. Meta Heuristic
4. Lookup Table

1. Hybrid Electric Vehicle (HEV)
2. Fuel-Cell Vehicle

هوشمند ژنتیک مرتفع شده است. در ادامه مقاله و در بخش ۲، مدل خودروی برقی با دو منبع ذخیره‌سازی انرژی شامل باتری و ابرخازن در محیط Advisor همراه با روابط توان آورده می‌شود. در بخش ۳ طراحی کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای مدیریت توان آورده می‌شود. در بخش ۴ نیز نتایج شبیه‌سازی و تست عملکرد سیستم در سیکل رانندگی داده شده ارائه می‌شود. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. مدل‌سازی خودروی برقی با دو منبع توان

در این بخش به مدل‌سازی خودروی برقی و فرمول‌بندی مسئله کنترل پرداخته می‌شود و روابط و محدودیت‌های مسئله مورد بررسی ارائه می‌گردد. طرح‌واره خودرو برقی مورد مطالعه که در نرم‌افزار Advisor پیاده‌سازی شده، در شکل (۲) آمده است. سیستم انتقال قدرت در این خودرو شامل واحد باتری، بانک ابرخازن، مبدل DC/DC، اینورتر فرکانسی، موتور الکتریکی AC و سیستم انتقال توان مکانیکی است. واحد باتری با بانک ابرخازن موازی شده است تا شین DC را ایجاد کنند. مبدل DC/DC ولتاژ DC شین را تنظیم می‌کند. اینورتر فرکانسی، ولتاژ DC کنترل‌شده را تبدیل به یک ولتاژ AC با فرکانس مناسب برای راه‌اندازی موتور می‌کند. سیستم انتقال شامل یک جعبه‌دنده کاهشی است که گشتاور موتور را چندین برابر می‌کند. در خودروی برقی با دو منبع باتری و ابرخازن، هنگامی که وسیله نقلیه توان بالایی برای حرکت لازم دارد، باتری و ابرخازن قدرت مورد نیاز را از طریق مبدل DC/DC، اینورتر، موتور الکتریکی و جعبه‌دنده به محور خودرو منتقل می‌کند.

در طول مسیر رانندگی، سیستم ذخیره‌سازی انرژی، انرژی خروجی را از طریق باس قدرت به موتور الکتریکی منتقل می‌کند و موتور نیز انرژی را به چرخ برای غلبه بر بار مسیر حرکت انتقال می‌دهد. در شکل (۳) نیروهای بار عمل‌کننده بر خودرو نمایش داده شده‌اند. برای غلبه بر نیروی بار مسیر، نیروی F_1 مورد نیاز است که با توجه به معادلات حرکت خودرو [۱۶]، نیروی F_1 مورد نیاز متشکل از چهار مؤلفه اصلی مطابق رابطه (۱) است: نیروی مقاومت آیرودینامیکی هوا (F_d)، نیروی اصطکاک چرخ‌ها (F_r)، نیروی مورد نیاز برای بالا رفتن از شیب (F_c) و نیروی مورد نیاز برای شتاب‌گیری (F_a).

$$F_1 = F_d + F_r + F_c + F_a \quad (1)$$

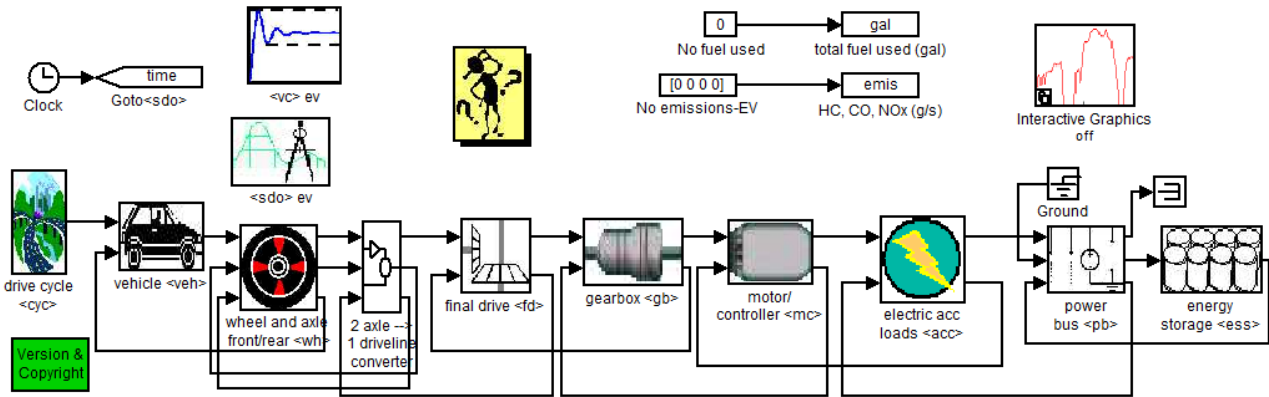
نیروی آیرودینامیکی مقاومت هوا (F_d) ناشی از برهم‌کنش بدنه خودرو با هوای اطراف در اثر حرکت خودرو است. این نیرو سه مؤلفه

خودروی برقی با باتری و ابرخازن از برنامه‌ریزی خطی تصادفی^۱ استفاده کرده است. در مرجع [۱۰] از یک روش بهینه مدیریت توان برای یک خودروی برقی با قابلیت شارژ سیمی^۲ استفاده کرده است که در آن از یک کنترل‌کننده زمان - حقیقی^۳ بر مبنای شبکه عصبی و بهینه‌سازی شده با PSO استفاده نموده است. مرجع [۱۱] نیز از ترکیب دو روش PSO و آنیلینگ شبیه‌سازی شده^۴ (SA) برای کاهش تلفات مصرف سوخت در خودروی برقی ترکیبی استفاده کرده است. در مرجع [۱۲] بر مبنای شرایط جاده و مانور حرکتی و مدل خودرو از یک روش تحلیلی برای تقسیم توان بین منابع انرژی در خودرو استفاده کرده است. این روش وابسته بسیار زیادی به دینامیک خودرو، سیکل رانندگی و شرایط جاده دارد.

استفاده از روش‌های کنترل و استنتاج فازی در مدیریت توان و انرژی به دلیل رفتار هوشمند و غیرخطی‌شان بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. در مرجع [۱۳] از یک راهبرد کنترل فازی برای مدیریت توان در یک خودروی برقی مجهز به باتری Ni-MH^۵ و ابرخازن استفاده شده است. توان مورد نیاز، حالت شارژ باتری و حالت شارژ ابرخازن ورودی‌های کنترل‌کننده فازی هستند و خروجی آن نیز، سهم هریک از این منابع در ایجاد توان مورد نیاز است. مرجع [۱۴] نیز از کنترل‌کننده فازی برای منظور مدیریت توان بین منابع انرژی خودروی برقی استفاده کرده است. از خروجی کنترل‌کننده فازی برای تعیین سطح جریان مورد نیاز باتری و ابرخازن برای نگهداری سطح ولتاژ لینک DC در مقدار دلخواه استفاده شده است. روش کنترل فازی نسبت به روش جدول جست‌وجو عملکرد بسیار بهتری دارد، اما تعیین توابع عضویت ورودی‌ها و قوانین فازی به تجربیات شخص خبره نیازمند است. برای رفع این نقیصه، مرجع [۱۵] از روش بهینه‌سازی تجمع ذرات^۶ (PSO) برای بهینه‌سازی رفتار کنترل‌کننده فازی استفاده کرده است. مدیریت توان با استفاده از چند روش هوشمند و مبتنی بر مدل دیگر در مراجع [۲۲] تا [۲۴] نیز ارائه شده‌اند.

با توجه به برتری‌های انکارناپذیر روش کنترل فازی نسبت به روش‌های کنترل تحلیلی و همچنین سایر روش‌های فراکاوشی و هوشمند، در تحقیق حاضر از این روش برای کنترل و مدیریت توان در خودروی برقی مجهز به باتری و ابرخازن استفاده شده است. مشکل تعیین توابع عضویت و قوانین فازی با استفاده از الگوریتم

1. Stochastic Dynamic Programming
2. Plug-in EV
3. Real-Time
4. Simulated Annealing (SA)
5. Nickel Metal Hydride
6. Particle Swarm Optimization (PSO)



شکل (۲): طرح‌واره خودروی الکتریکی موردنظر در نرم‌افزار Advisor

در این رابطه، M جرم خودرو است که برحسب کیلوگرم بیان می‌شود، g شتاب گرانشی زمین و C_r ضریب مقاومت چرخشی هستند. نیروی صعود از شیب (F_c)، نیروی لازم برای بالا رفتن وسیله نقلیه از شیب‌ها است که برابر است با:

$$F_c = M \times g \times \sin \alpha \quad (4)$$

که در آن، α زاویه شیب است. نیروی لازم برای ایجاد شتاب مورد نیاز خودرو نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$F_a = M \times \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

به این ترتیب نیروی مقاوم کل در برابر حرکت وسیله نقلیه را می‌توان از رابطه (۶) به دست آورد:

$$F_1 = 0.5\rho C_d A V^2 + MgC_r + Mg \sin \alpha + M \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

با ضرب این نیرو در سرعت خودرو در هر لحظه از زمان رانندگی، توان مورد نیاز برای حرکت خودرو مطابق رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$P_{load} = \left(0.5\rho C_d A V^2 + MgC_r + Mg \sin \alpha + M \frac{dV}{dt} \right) \times \left(\frac{V}{3600} \right) \quad (7)$$

در رابطه فوق، نیروها برحسب نیوتن، سرعت برحسب کیلومتر بر ساعت و توان مورد نیاز برحسب کیلووات هستند. با در نظر گرفتن بازده خودروی برقی، می‌توان توان مورد نیاز از منابع انرژی خودرو را که در اینجا باتری و ابرخازن هستند، به صورت زیر به دست آورد:

$$P_{req} = \frac{1}{\eta} P_{load} \quad (8)$$

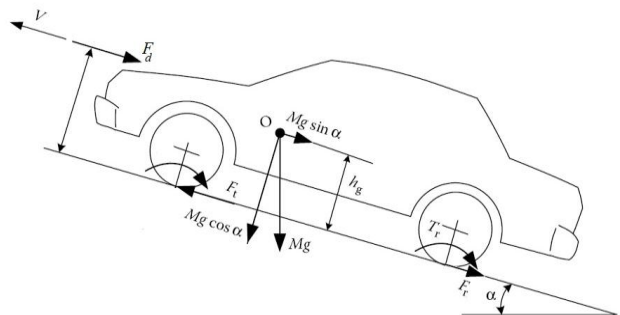
از یک طرف، برای اینکه اطمینان حاصل شود که وسیله نقلیه می‌تواند به طور مؤثر کار کند، سیستم مدیریت انرژی^۱ (ESS) باید

دارد که هر یک از آن‌ها بر اثر یک پدیده آیرودینامیکی متفاوتی به وجود می‌آیند: نیروی کشش اصطکاک پوسته‌ای ناشی از جریان هوا در اطراف بدنه خودرو، نیروی کشش القایی بر اثر جریان هوا در پشت خودرو و در نهایت، نیروی فشار طبیعی که متناسب با سطح جلویی خودرو و سرعت خودرو است. مقادیر کشش اصطکاک پوسته‌ای و کشش القایی نسبت به کشش فشار طبیعی، معمولاً کم بوده و قابل صرف نظر کردن هستند. نیروی مقاومت هوا (F_d) می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$F_d = 0.5\rho \times C_d \times A \times V^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق، ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، A مساحت جلویی بدنه خودرو برحسب مترمربع و V سرعت خودرو برحسب کیلومتر بر ساعت است. نیروی اصطکاک چرخ‌ها یا مقاومت چرخشی (F_r) که به علت تغییر شکل سطح چرخ و جاده است. تغییر شکل در چرخ به شدت در ایجاد این نیرو غالب است، در حالی که تغییر شکل سطح جاده بسیار ناچیز است. نیروی اصطکاک چرخ‌ها با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F_r = M \times g \times C_r \quad (3)$$



شکل (۳): نیروهای عمل کننده بر خودرو در هنگام پیمایش شیب جاده [۵]

تعیین نسبت مشارکت منابع ذخیره‌ساز انرژی $K_{bat}(t)$ و $K_{sc}(t)$ برای تأمین توان درخواستی خودرو است. با توجه به اینکه مسئله مدیریت توان دو منبع، عملاً یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی است، روش‌های بهینه‌سازی سنتی در این کاربرد کارآمد نیستند. روش فازی راه‌حل مناسبی برای ساخت کنترل غیرخطی با استفاده از اطلاعات اکتشافی فراهم می‌کند [۱۷]. با این حال، کنترل فازی دارای برخی محدودیت‌ها از جمله تعیین صحیح توابع عضویت و قوانین کنترلی است. این محدودیت‌ها با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی قابل اصلاح است که در این بخش از الگوریتم ژنتیک برای تعیین توابع عضویت بهینه سیستم فازی استفاده می‌شود. در ابتدا مروری اجمالی بر الگوریتم ژنتیک پایه داشته و سپس به الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح پرداخته می‌شود.

۱.۳. الگوریتم ژنتیک پایه

الگوریتم‌های ژنتیک (GA) روش‌های جست‌وجوی و بهینه‌سازی احتمالاتی هستند که براساس مفاهیم برگرفته از تکامل بیولوژیکی طبیعی مانند تولیدمثل، جفت‌گیری و جهش ساخته می‌شوند. الگوریتم‌های ژنتیک معمولاً به‌عنوان یک شبیه‌ساز کامپیوتر که در آن جمعیت یک نمونه انتزاعی (کروموزوم‌ها) از نامزدهای راه‌حل یک مسئله بهینه‌سازی به راه‌حل بهتری منجر شود، پیاده‌سازی می‌شوند. به‌طور سنتی، راه‌حل‌ها به شکل رشته‌هایی از ۰ و ۱ بودند، اما امروزه به گونه‌های دیگری هم پیاده‌سازی شده‌اند. فرضیه با جمعیتی کاملاً تصادفی منحصر به فرد آغاز می‌شود و در نسل‌ها ادامه می‌یابد. در هر نسل، گنجایش تمام جمعیت ارزیابی می‌شود، چندین فرد منحصر در فرایندی تصادفی از نسل جاری انتخاب می‌شوند (براساس شایستگی‌ها) و برای شکل دادن نسل جدید اصلاح می‌شوند (کسر یا دوباره ترکیب می‌شوند) و در تکرار بعدی الگوریتم به نسل جاری تبدیل می‌شوند.

اولین گام برای پیاده‌سازی یک الگوریتم ژنتیکی، تعیین روش کدگذاری و تعریف تابع هدف است و هر مسئله‌ای، کدگذاری مربوط به خود را دارد. تابع شایستگی یا برازندگی می‌تواند به صورت یک تابع صعودی یا نزولی از اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. در تعریف تابع برازندگی، با توجه به نوع مسئله بهینه‌سازی می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. مؤلفه‌های ژنتیک موجودیت‌هایی هستند که به تنظیم عملکرد الگوریتم ژنتیک و انجام بهتر و حساب‌شده آن کمک کنند و عبارت‌اند از: تعداد جمعیت، نرخ عملگر ضربدری و نرخ عملگر جهش ناگهانی [۱۸]. اندازه جمعیت (N) در کارایی الگوریتم مؤثر است، به طوری که اگر یک جمعیت کوچک

انرژی کافی برای برآوردن توان مورد نیاز خود یعنی $P_{req}(t)$ در هر زمان را داشته باشد. از طرف دیگر، با فرض اینکه فاکتور توان باتری و ابرخازن در هر لحظه به ترتیب برابر با $K_{bat}(t)$ و $K_{sc}(t)$ هستند، میزان توان مورد نیاز از هر منبع را می‌توان به کمک روابط زیر بیان کرد:

$$P_{bat} = K_{bat}(t) \times P_{req}(t) \quad (9)$$

$$P_{sc} = K_{sc}(t) \times P_{req}(t)$$

قید دیگر آن است که مجموع ضرایب مشارکت توان باتری و ابرخازن $K_{bat}(t)$ و $K_{sc}(t)$ در هر لحظه باید برابر با یک بماند. بنابراین با تغییر این دو ضریب در هر لحظه می‌توان توان مورد نیاز از باتری و ابرخازن را تغییر داد. از سوی دیگر اگر حالت شارژ باتری^۱ (SOC) و ابرخازن به بیش از حد بالای انتخاب شده‌شان برسد، توانایی آن‌ها در جذب انرژی ترمزی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، انرژی ترمزی مازاد به هدر می‌رود. در مقابل اگر حالت شارژ بیش از حد کم باشد، ESS ممکن است قدرت کافی برای پاسخ‌گویی به نیاز خودرو در هنگام شتاب‌گیری را نداشته باشد. به‌منظور گسترش چرخه عمر باتری و ابرخازن، میزان حالت شارژ باتری و ابرخازن باید تا آنجا که ممکن است در محدوده از قبل تعریف شده باشند. قیود مربوط به حالت شارژ منابع انرژی خودروهای برقی به شرح زیرند:

$$SOC_{bat}^{Min} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{Max} \quad (10)$$

$$SOC_{sc}^{Min} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{Max}$$

در این مقاله، حداقل سطح شارژ خازن‌ها و باتری‌ها ۰/۲ و بیشینه شارژ آن‌ها ۰/۸ در نظر گرفته شده است تا محدودیت‌های ذکر شده لحاظ شوند. با توجه به بحث بالا در خصوص محدودیت‌ها و هدف مدیریت توان منابع ذکر شده، مدل ریاضی مدیریت توان دو منبع می‌تواند به صورت رابطه (۱۱) بیان شود. خروجی سیستم مدیریت توان، سهم مشارکت هر کدام از منابع ذخیره‌سازی انرژی در ایجاد توان مورد نیاز خودرو هستند.

$$\min Energy_{req} | K_{bat}(t), K_{sc}(t)$$

subject to :

$$P_{req} = \frac{1}{\eta} P_{load} \quad (11)$$

$$K_{bat}(t) + K_{sc}(t) = 1$$

$$SOC_{bat}^{Min} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{Max}$$

$$SOC_{sc}^{Min} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{Max}$$

۳. مدیریت بهینه توان بر مبنای کنترل‌کننده فازی

بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح^۲

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، وظیفه سیستم مدیریت توان،

1. State-of-Charge
2. Mixed Integer Genetic Algorithm

در این رابطه، β_i یک عدد تصادفی با توزیع لاپلاسی است که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$\beta_i = \begin{cases} a - b \cdot \log(u_i), & r_i \leq 0.5 \\ a + b \cdot \log(u_i), & r_i > 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

در این رابطه، u_i و r_i هر دو اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت و بین صفر و یک هستند. a و $b > 0$ به ترتیب پارامترهای موقعیتی و ابعادی هستند. برای متغیرهای عدد صحیح $b = b_{int}$ و برای سایر متغیرها $b = b_{real}$ هستند.

۲.۲.۳. عملگر جهش ناگهانی با توزیع نمایی

توزیع نمایی برای عملگر جهش ناگهانی نخستین بار در [۲۰] مورد استفاده قرار گرفت. مطابق این مرجع، پاسخ با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x = \begin{cases} \bar{x} - s(\bar{x} - x'), & t < r \\ \bar{x} + s(x'' - \bar{x}), & t \geq r \end{cases} \quad (14)$$

در این رابطه، s یک متغیر تصادفی با توزیع نمایی است که از رابطه (۱۵) حاصل می‌شود:

$$s = w^p \quad (15)$$

در این رابطه، w یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک و p اندیس جهش است. میزان این اندیس برای متغیرهای صحیح و پیوسته متفاوت است. در رابطه (۱۴)، r یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بوده و t با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t = \frac{(\bar{x} - x')}{(x'' - \bar{x})} \quad (16)$$

که در آن حد پایین و بالا برای متغیرهای موجود در پاسخ x به ترتیب x' و x'' هستند. برای عملگر انتخاب از عملگر انتخاب معرفی شده در مرجع [۲۱] در این مقاله استفاده شده است. به این ترتیب تنها عملگر باقی مانده عملگر گرد کردن است که برای اینکه متغیرهای صحیح بعد از گذراندن عملگرهای ضربدری و جهش نیز اعداد صحیح باقی بمانند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳.۲.۳. عملگر گرد کردن

برای اطمینان از اینکه متغیرهای صحیح در هر عضو جمعیت بعد از گذراندن مراحل جهش و عملگر ضربدری کماکان اعداد صحیح هستند، از عملگر گرد کردن در الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح استفاده می‌شود. اگر متغیر صحیح بعد از گذراندن عملگرهای جهش نمایی و ضربدری لاپلاس مقدار صحیحی نداشته باشد، این متغیر با احتمال‌های برابر به میزان ۵۰ درصد با $[x_i]$ یا $[x_i]+1$ جایگزین می‌شود. در اینجا منظور از $[x_i]$ عملگر جزء صحیح است.

داشته باشیم در یک عملکرد ضعیف تمام نتایج فضای ممکن یک مسئله را پوشش داد و بررسی کرد. انتخاب یک جمعیت بزرگ اگرچه سبب پوشش فضای بیشتری شده و از حل و همگرایی زود هنگام در نقاط محدود و محلی جلوگیری می‌کند، نیاز به ارزیابی بیشتری در هر بار تولید دارد و طبیعتاً سرعت نرخ همگرایی را آهسته‌تر می‌کند. نرخ عملگر ضربدری (C) جزء تعیین‌کننده در عملکرد ضربدری است. در هر تولید جمعیت جدید، تعداد $C \times N$ رشته در عملکرد ضربدری دستخوش تغییر می‌شوند. نرخ بالاتر عملگر ضربدری به آن معناست که رشته‌های جدیدی با سرعت بیشتر وارد جمعیت می‌شوند. اگر نرخ عملگر ضربدری خیلی زیاد باشد، حذف رشته‌ها سریع‌تر از گزینش آن‌ها برای بهبودی انجام می‌پذیرد و برعکس کم بودن این مقدار سبب یک حالت سکون می‌شود که مسبب کاهش نرخ شناسایی است. نرخ جهش ناگهانی (M) عبارت است از احتمال تغییر اتفاقی که وضعیت هر بیت از هر رشته در یک جمعیت جدید پس از انجام هر مرحله انتخاب ممکن است به خود بگیرد. اساساً این مرحله دوم عملگر جست‌وجوست که تنوع در جمعیت را افزایش می‌دهد. تقریباً جهش‌های ناگهانی به مقدار $M \times N \times L$ در هر تولید وجود دارد که L طول رشته است. مقدار کم M برای جلوگیری از اینکه هر وضعیت بیت در مقدار مشخصی باقی بماند، کمک می‌کند در حالی که افزایش آن سبب جست‌وجوی اتفاقی به‌طور مؤثرتری خواهد شد.

۲.۳. الگوریتم ژنتیک ترکیبی با اعداد صحیح

الگوریتم ژنتیک پایه که برای حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته طراحی شده است، در بخش قبل شرح داده شد. به‌منظور استفاده از این الگوریتم برای مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته و صحیح، در آن تغییراتی داده می‌شود. در ادامه عملگرهای ضربدری لاپلاس و جهش ناگهانی با توزیع نمایی معرفی خواهند شد. همچنین برای اینکه متغیرهای صحیح در هر عضو جمعیت در خروجی این عملگرها اعداد صحیح باشند، از یک عملگر جدید به نام گرد کردن استفاده شده است.

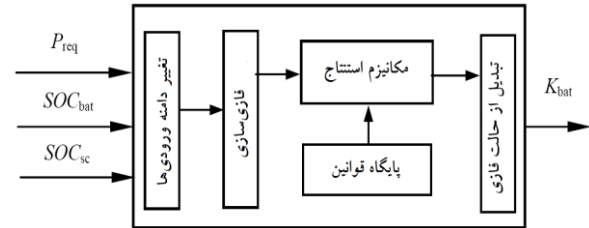
۱.۲.۳. عملگر ضربدری لاپلاس^۱

عملگر ضربدری لاپلاس در ابتدا در مرجع [۱۹] معرفی شد. دو فرزند y^1 و y^2 از والدین x^1 و x^2 به‌طریق زیر ایجاد می‌شوند:

$$\begin{aligned} y_i^1 &= x_i^1 + \beta_i \cdot |x_i^1 - x_i^2| \\ y_i^2 &= x_i^2 + \beta_i \cdot |x_i^1 - x_i^2| \end{aligned} \quad (12)$$

۳.۳. طراحی کنترل کننده فازی بهینه

در شکل (۴) ساختار کلی و ساده شده کنترل کننده فازی مورد استفاده در مدیریت توان منابع ذخیره ساز انرژی خودرودی برقی نشان داده شده است. ورودی های این سیستم، توان خروجی مورد نیاز، حالت شارژ باتری ها و حالت شارژ خازن هستند. خروجی این کنترل کننده ضریب مشارکت توان باتری است که بر مبنای آن ضریب مشارکت توان ابر خازن از رابطه (۱۱) به راحتی تعیین می شود.



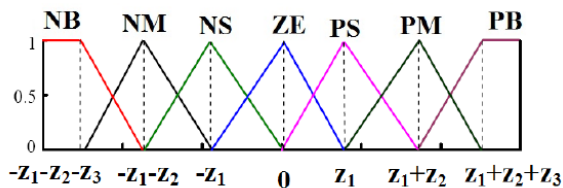
شکل (۴): طرحواره کلی سیستم کنترل فازی برای مدیریت توان منابع ذخیره ساز انرژی خودرودی برقی

کوچک»، «مثبت متوسط» و «مثبت بزرگ» در نظر گرفته شده اند. این کمیت ها همگی حول مقدار صفر تقارن دارند. برای دو ورودی فازی حالت شارژ باتری (SOC_{bat}) و ابرخازن (SOC_{sc})، توابع عضویت مربوطه به صورت LE, ME و GE بین محدوده های $0/2$ تا $0/9$ مقادیر حالت شارژ باتری و ابرخازن در نظر گرفته شده اند که به ترتیب بیانگر مقادیر فازی کوچک، متوسط و بزرگ هستند. همچنین خروجی سیستم فازی (K_{bat}) بین دو مقدار $0/2$ و 1 در نظر گرفته شده است و متغیر فازی مربوط به آن می تواند مقادیر فازی LE, ME, ML, MB و GE را اختیار کند که به ترتیب به معنای کوچک، متوسط کوچک، متوسط، متوسط بزرگ و بزرگ هستند. در انتخاب مرزهای توابع عضویت فوق، سعی شده است از همان روش متداول انتخاب در سیستم های فازی پایه ای استفاده گردد و از دانش شخص خبره استفاده نشده و قرار است که الگوریتم ژنتیک به جای فرد خبره قرار گرفته و توابع عضویت را اصلاح کند.

برای استنتاج فازی از روش ممدانی استفاده می شود. تعداد قوانین فازی اولیه مورد استفاده در بخش استنتاج فازی در شکل (۴) با توجه به تعداد زیاد متغیرهای ورودی و توابع عضویت تخصیص داده شده به هر یک، ۶۳ عدد هستند.

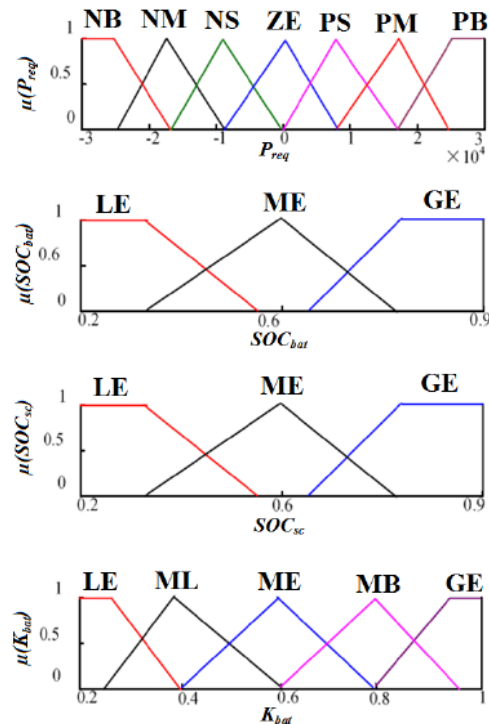
در جدول های (۱) تا (۳)، کل قوانین مورد استفاده به ازای مقادیر فازی مختلف حالت شارژ ابرخازن آورده شده اند. نوشتن این قوانین بر مبنای دریافت شهودی از عملکرد سیستم بوده که چندان نیاز به دانش فرد خبره ندارد؛ برای مثال از جدول (۱) نتیجه می شود اگر P_{req} برابر NB شود و SOC_{sc} و SOC_{bat} نیز هر دو LE شوند، آنگاه خروجی سیستم یعنی K_{bat} برابر ME است.

برای داشتن عملکردی بهینه برای سیستم کنترل فازی، توابع عضویت هر سه متغیر ورودی سیستم فازی باید به درستی تعیین شوند. در سیستم کنترل فازی پایه این مجموعه ها باید توسط فرد خبره تعیین شوند، اما در سیستم ارائه شده در این مقاله، بهینه ساز بر مبنای الگوریتم ژنتیک، این کار را انجام می دهد. برای این منظور، مرزهای توابع عضویت فازی در شکل های (۵) به صورت پارامتری در نظر گرفته می شوند؛ برای مثال و مطابق شکل (۶)، توابع عضویت ورودی فازی P_{req} با سه پارامتر Z_1 ، Z_2 و Z_3 نمایش داده می شود.



شکل (۶): پارامترهای توابع عضویت متناظر با متغیر ورودی P_{req}

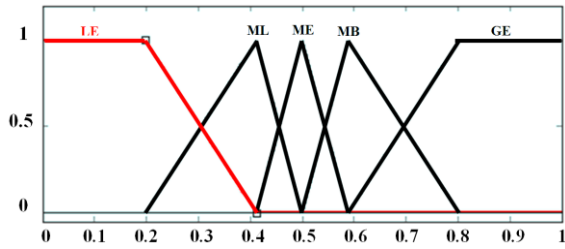
توابع عضویت برای ورودی های سه سیستم فازی در شکل (۵) نشان داده شده اند.



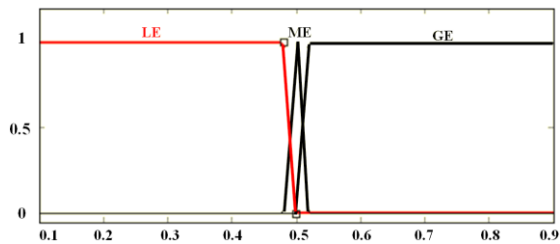
شکل (۵): توابع عضویت ورودی ها و خروجی کنترل کننده فازی

برای ورودی توان مورد نیاز (P_{req})، هفت تابع عضویت فازی NB, NM, NS, ZE, PS, PM و PB به ترتیب متناظر با کمیت های فازی «منفی بزرگ»، «منفی متوسط»، «منفی کوچک»، «صفر»، «مثبت

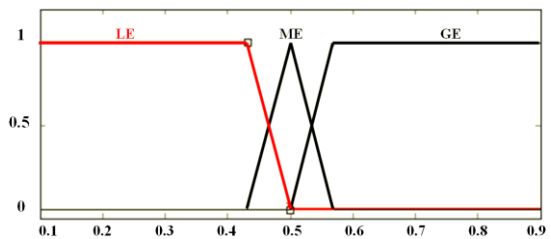
ابرخازن (SOC_{sc}) رسم شده‌اند. با مقایسه این جدول‌ها با جدول‌های (۱) تا (۳) می‌توان دریافت که تغییراتی در قوانین در برخی حالت‌ها انجام گرفته است.



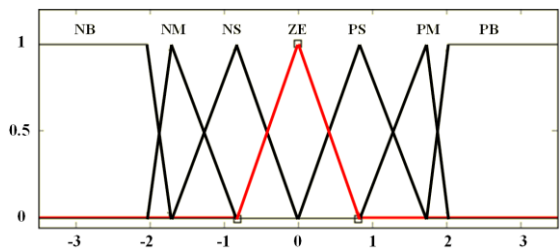
(الف) متغیر ورودی توان مورد نیاز (P_{req})



(ب) متغیر ورودی حالت شارژ باتری



(ج) متغیر ورودی حالت شارژ ابرخازن



(د) متغیر خروجی ضریب مشارکت باتری

شکل (۷): توابع عضویت کنترل‌کننده فازی بهینه شده

جدول (۴): قوانین فازی بهینه وقتی $SOC_{sc} = LE$

K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	ML	MB	MB
	NM	MB	ML	ME
	NS	LE	MB	LE
	ZE	ML	GE	MB
	PS	MB	GE	MB
	PM	GE	MB	MB
	PB	GE	LE	MB

جدول (۱): قوانین فازی اولیه وقتی $SOC_{sc} = LE$

K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	ME	ML	LE
	NM	ME	ML	LE
	NS	ML	LE	LE
	ZE	LE	LE	LE
	PS	MB	GE	GE
	PM	MB	GE	GE
	PB	MB	GE	GE

جدول (۲): قوانین فازی اولیه وقتی $SOC_{sc} = ME$

K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	ME	ML	LE
	NM	MB	ML	LE
	NS	MB	LE	LE
	ZE	LE	LE	LE
	PS	ML	ME	GE
	PM	LE	ME	GE
	PB	ML	MB	GE

جدول (۳): قوانین فازی اولیه وقتی $SOC_{sc} = GE$

K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	GE	MB	ME
	NM	GE	ML	LE
	NS	GL	LE	LE
	ZE	LE	LE	LE
	PS	LE	LE	LE
	PM	LE	ML	ME
	PB	LE	ME	MB

برای توابع عضویت متناظر با متغیرهای ورودی حالت شارژ باتری (SOC_{bat}) و ابرخازن (SOC_{sc}) نیز به همین طریق عمل می‌شود و به ترتیب پارامترهای Z_4 , Z_5 , Z_6 و Z_7 در نظر گرفته می‌شوند که از ارائه شکل‌های مربوط صرف‌نظر شده است؛ لذا تعداد کل پارامترهایی که باید مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شوند ۷ عدد است. این ۷ پارامتر در واقع ۷ متغیر بهینه‌سازی را معرفی می‌کنند. این متغیرها پیوسته‌اند. همچنین متغیرهای دیگر شامل خروجی قوانین اگر-آنگاه هستند. در مجموع سه حالت شارژ باتری، سه حالت شارژ ابرخازن و ۷ وضعیت توان مورد نیاز وجود دارد. بنابراین ۶۳ قانون اگر-آنگاه وجود دارد. این ۶۳ قانون، ۶۳ متغیر تصمیم‌گیری را معرفی می‌کنند. این متغیرها اعداد صحیح هستند. با توجه به اینکه برای خروجی (ضریب مشارکت توان باتری) ۵ حالت وجود دارد، این متغیرها بین ۱ تا ۵ هستند. در شکل (۷)، توابع عضویت بهینه ورودی‌ها و خروجی کنترل‌کننده فازی که از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به دست آمده، نشان داده شده‌اند. با مقایسه این شکل با شکل (۵)، می‌توان به تغییرات توابع عضویت متغیرها پی برد. همچنین قوانین اگر-آنگاه بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک در جدول‌های (۴) تا (۶) به‌ازای مقادیر مختلف حالت شارژ

ژنتیک با دو روش مدیریت توان گسسته on/off بهینه و مدیریت توان به روش فازی پایه‌ای مقایسه می‌شود. برای تست عملکرد کنترل‌کننده‌ها از سیکل رانندگی استاندارد شهری EPA-UDDS بهره برده شده است. در شکل (۸) مشخصات کلی این سیکل و تغییرات سرعت خودرو در طول ۱۳۶۹ ثانیه طی آن دیده می‌شود. به کمک نرم‌افزار Advisor و انجام شبیه‌سازی، توان مورد نیاز برای طی نمودن سیکل رانندگی داده‌شده را می‌توان به دست آورد. توان مورد نیاز موتور خودرو در هر ثانیه برای سیکل داده‌شده در شکل (۹) نشان شده است.

۱.۴. عملکرد کنترل‌کننده گسسته on/off بهینه

در این بخش رفتار کنترل‌کننده گسسته on/off در سیکل رانندگی EPA-UDDS مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کنترل‌کننده ساده از حالت شارژ باتری، حالت شارژ ابرخازن و میزان توان مورد نیاز برای افزایش سرعت (شتاب مثبت) یا ترمز (شتاب منفی) برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. دو مقدار برای حالت شارژ باتری و دو مقدار برای حالت شارژ ابرخازن در نظر گرفته شده است و لذا تعداد کل حالت‌ها ۸ حالت خواهد بود.

جدول (۵): قوانین فازی بهینه وقتی $SOC_{sc} = ME$

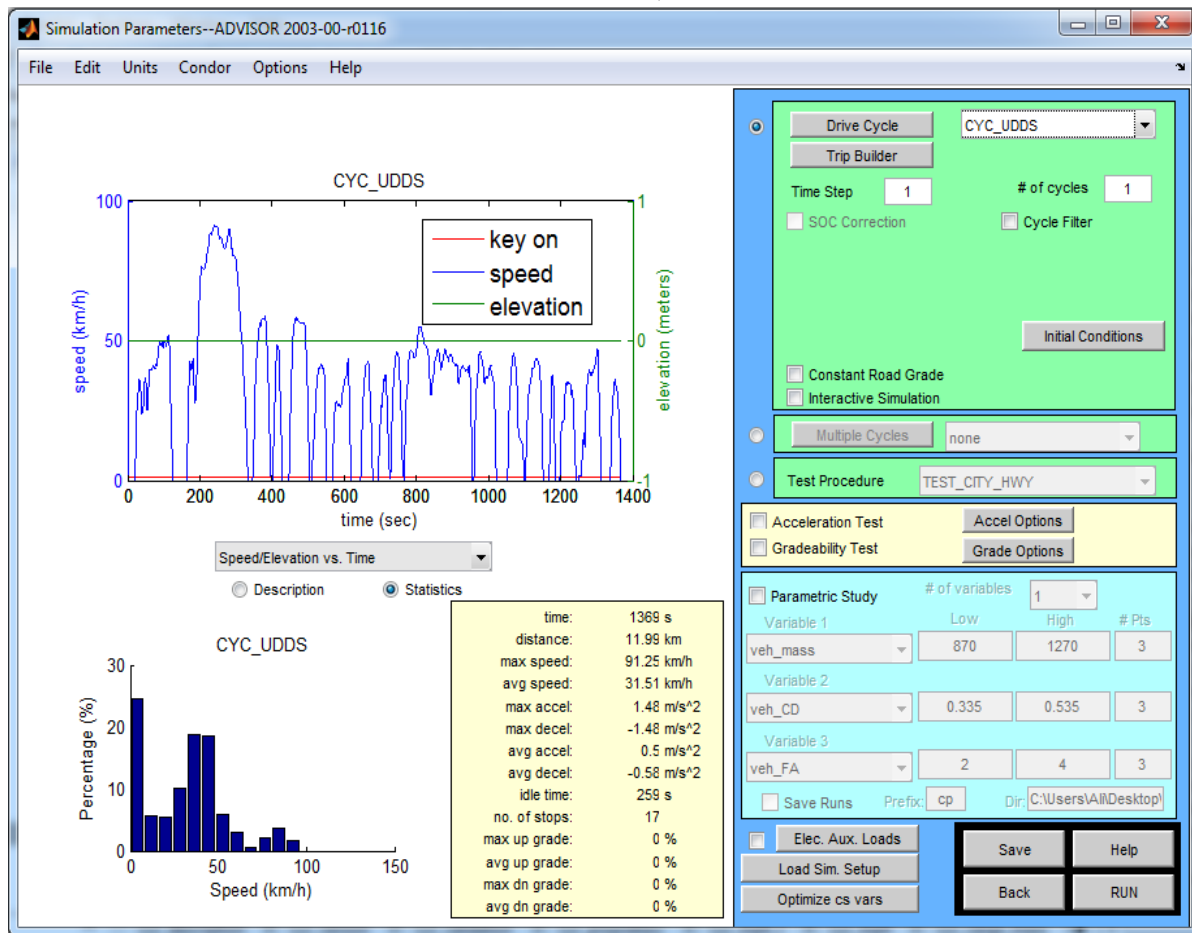
K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	LE	MB	MB
	NM	MB	ML	GE
	NS	GE	MB	GE
	ZE	MB	MB	GE
	PS	ME	ML	MB
	PM	GE	ML	ML
	PB	ML	ML	ML

جدول (۶): قوانین فازی بهینه وقتی $SOC_{sc} = GE$

K_{bat}		SOC_{bat}		
		LE	ME	GE
P_{req}	NB	MB	LE	MB
	NM	MB	MB	MB
	NS	MB	MB	MB
	ZE	GE	MB	LE
	PS	MB	ML	MB
	PM	MB	ML	ML
	PB	MB	ML	MB

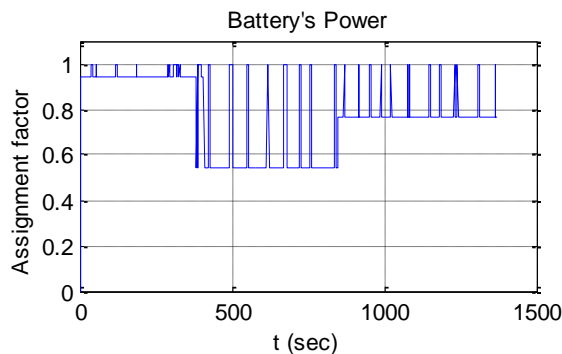
۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی بهینه پیشنهادی برای مدیریت توان و نحوه شارژ و تخلیه ابرخازن و باتری یک خودروی برقی پرداخته می‌شود. روش فازی بهینه‌شده با الگوریتم

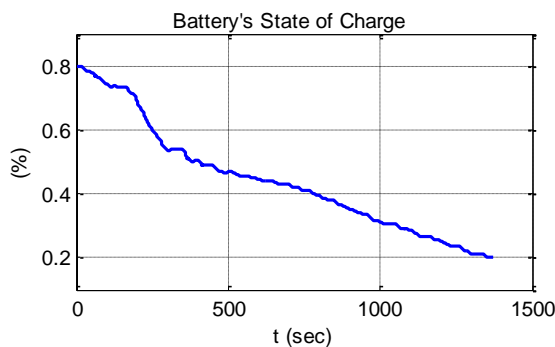


شکل (۸): نمودار تغییرات سرعت خودرو طی سیکل رانندگی EPA-UDDS در نرم‌افزار Advisor

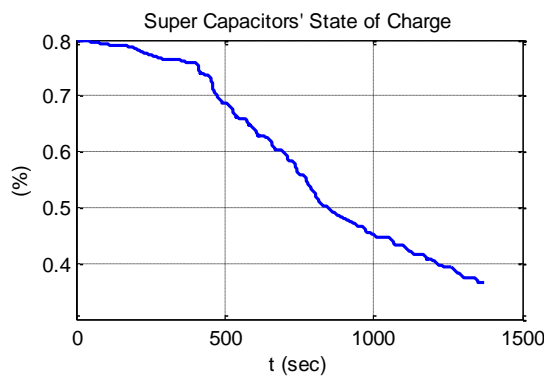
شارژ باتری و ابرخازن را به دست آورد. شکل (۱۲) مقدار مشارکت باتری در تأمین توان مورد نیاز موتور را نشان می‌دهد. سهم خازن‌ها نیز به راحتی از تفاضل مقدار مشارکت باتری از عدد واحد به دست می‌آید. شکل (۱۳) حالت شارژ باتری و ابرخازن را در طول زمان نشان می‌دهد. مقادیر اولیه برای شارژ خازن‌ها و باتری‌ها $0/8$ بیشینه شارژ این منابع در نظر گرفته شده است. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهند، قید مربوط به کمینه شارژ خازن‌ها با این کنترل‌کننده ارضا نمی‌شود. همچنین کل انرژی مصرف‌شده (مجموع انرژی تحویلی خازن‌ها و باتری) با استفاده از این کنترل‌کننده، $71/6$ مگاژول است.



شکل (۱۰): نسبت مشارکت باتری برای تأمین توان مورد نیاز در روش کنترل on/off بهینه

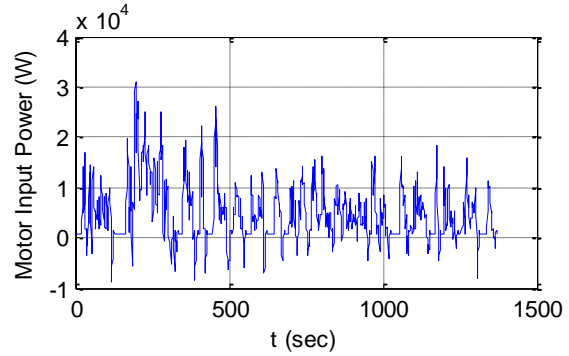


الف. باتری



ب. ابرخازن

شکل (۱۱): حالت شارژ باتری و ابرخازن در طی سیکل رانندگی EPA-UDDS در روش کنترل گسسته on/off بهینه



شکل (۹): توان مورد نیاز خودرو در سیکل EPA-UDDS

بنابراین متغیرهای تصمیم‌گیری که درصد مشارکت باتری و ابرخازن برای تأمین توان مورد نیازند، باید برای هر یک از این ۸ حالت به دست آیند. این امر باید به گونه‌ای صورت پذیرد که کل انرژی مصرف‌شده از دو منبع کمینه شود و قیدهای حالت شارژ رعایت شوند. نتایج بهینه‌سازی برای این روش در جدول (۷) آورده شده‌اند.

جدول (۷): مجموعه قوانین برای کنترل‌کننده گسسته on/off بهینه

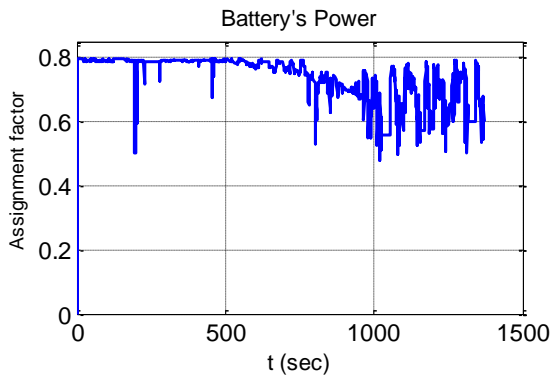
شماره حالت	توان مورد نیاز	حالت شارژ باتری	حالت شارژ ابرخازن	درصد مشارکت باتری	درصد مشارکت ابرخازن
۱	شتاب مثبت	۲۰ تا ۵۰	۲۰ تا ۵۰	۸۴,۴	۱۵,۶
۲	شتاب مثبت	۲۰ تا ۵۰	۵۰ تا ۸۰	۹۴,۴	۵,۶
۳	شتاب مثبت	۵۰ تا ۸۰	۲۰ تا ۵۰	۹۶,۵	۳,۵
۴	شتاب مثبت	۵۰ تا ۸۰	۵۰ تا ۸۰	۶۸,۸	۳۱,۲
۵	شتاب منفی	۲۰ تا ۵۰	۲۰ تا ۵۰	۹۷,۷	۲,۳
۶	شتاب منفی	۲۰ تا ۵۰	۵۰ تا ۸۰	۵,۵	۹۴,۵
۷	شتاب منفی	۵۰ تا ۸۰	۲۰ تا ۵۰	۹۹,۸	۰,۲
۸	شتاب منفی	۵۰ تا ۸۰	۵۰ تا ۸۰	۱۰۰	۰

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار Advisor برای این روش کنترلی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آورده شده‌اند. شکل (۱۰) نسبت مشارکت باتری برای تأمین توان درخواستی شکل (۹) طی سیکل رانندگی EPA-UDDS را نمایش می‌دهد. همچنین در شکل (۱۱) حالت شارژ باتری و ابرخازن طی این سیکل رانندگی را نشان می‌دهد. باتری در مواقع بیشتری مجبور به توان‌دهی به بار شده است. همچنین کل انرژی مصرف‌شده (مجموع انرژی تحویلی خازن‌ها و باتری‌ها) با استفاده از این کنترل‌کننده $64/6$ مگاژول به دست می‌آید.

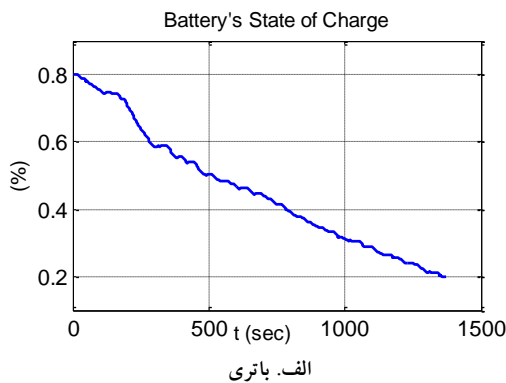
۲.۴. عملکرد کنترل‌کننده فازی پایه

با استفاده از کنترل‌کننده فازی پایه و شبیه‌سازی ثانیه‌به‌ثانیه سیکل رانندگی می‌توان با توجه به توان مورد نیاز موتور در هر لحظه، حالت

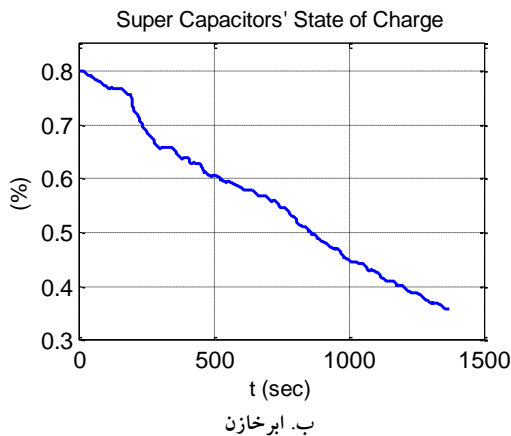
اما با انجام بهینه‌سازی اکنون شارژ باقی‌مانده نهایی برای خازن‌ها و باتری‌ها قید کمینه شارژ قابل قبول را ارضا می‌کند. همچنین کل انرژی مصرف‌شده با استفاده از کنترل‌کننده بهینه ۵۵/۶ مگاژول است. همان‌طور که دیده شد این رقم برای کنترل‌کننده پایه ۷۱/۶ مگاژول بوده است.



شکل (۱۴): نسبت مشارکت باتری برای تأمین توان مورد نیاز در روش کنترل فازی بهینه



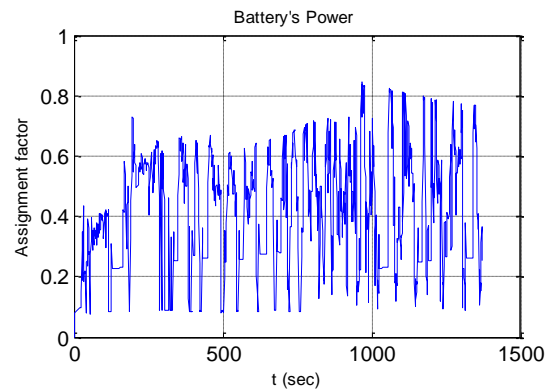
شکل (۱۵): حالت شارژ باتری و ابرخازن در طی سیکل رانندگی در روش کنترل فازی بهینه



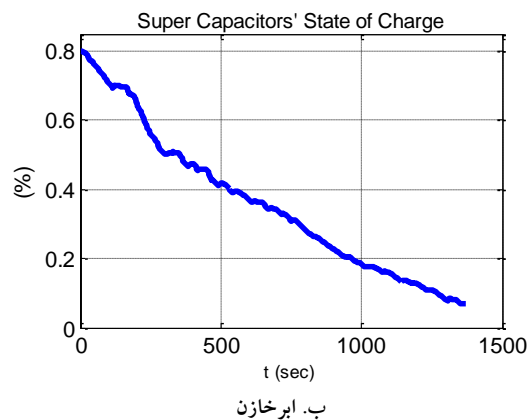
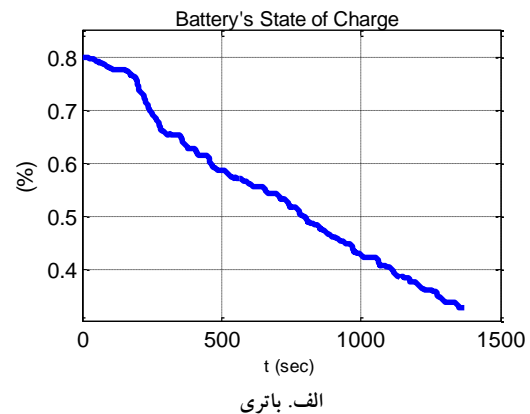
شکل (۱۵): حالت شارژ باتری و ابرخازن در طی سیکل رانندگی در روش کنترل فازی بهینه

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدیریت بهینه توان در خودروی برقی مجهز به دو سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری و ابرخازن با استفاده از سه روش کنترل گسسته on/off بهینه، کنترل‌کننده فازی پایه و کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱۲): نسبت مشارکت باتری برای تأمین توان مورد نیاز در روش کنترل فازی پایه‌ای



شکل (۱۳): حالت شارژ باتری و ابرخازن در طی سیکل رانندگی در روش کنترل فازی پایه‌ای EPA-UDDS

۳.۴. عملکرد کنترل‌کننده فازی بهینه

با به‌کارگیری توابع عضویت بهینه برای ورودی‌ها و خروجی و قوانین اگر-آنگاه بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک، عملکرد کنترل‌کننده فازی بهینه برای سیکل EPA-UDDS نیز شبیه‌سازی شده است. شکل (۱۴) سهم باتری در تأمین توان مورد نیاز موتور را نشان می‌دهد. شکل (۱۵) نیز حالت شارژ باتری و ابرخازن در طول این سیکل رانندگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش قبل و هنگام استفاده از کنترل‌کننده فازی پایه‌ای دیده شد، قید مربوط به کمینه شارژ خازن‌ها ارضا نمی‌شد.

درصد و ۱۶ درصد را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده به‌خوبی نشان داد که تعیین توابع عضویت بهینه برای ورودی‌ها و خروجی مورد نظر و قوانین اگر-آنگاه فازی اهمیت فراوانی دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیئت‌تحریریه مجله علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی کمال سپاسگزاری را دارند.

از سیکل استاندارد رانندگی شهری به‌منظور ارزیابی روش‌های پیشنهادی در این مطالعه استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که درحالی‌که کنترل‌کننده فازی قادر به تخصیص مناسب منابع نیست، کنترل‌کننده فازی بهینه به‌درستی این امر را انجام می‌دهد. همچنین کل انرژی مصرف‌شده با استفاده از کنترل‌کننده بهینه، ۵۵/۶ مگاژول است که در مقایسه با کنترل‌کننده فازی پایه (با مقدار ۷۱/۶) و کنترل‌کننده گسسته on/off بهینه (با مقدار ۶۴/۶) کاهش مصرف ۲۸

مراجع

- [1] Chan, C.C., Wong, Y.S., Bouscayrol, A., Chen, K., "Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles", Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No.4, pp. 603-607, April 2009.
- [۲] حلوانی نیاسر، ابوالفضل، گلابی، سعید، «طراحی و ساخت خودروی سواری هیبرید برقی پراید در دانشگاه کاشان»، نشریه علمی - ترویجی انرژی ایران، دوره ۱۸، شماره ۴، صفحه ۹۵-۱۱۴، زمستان ۱۳۹۴.
- [3] Oua, X., Zhanga, X., Changa, S., "Scenario Analysis on Alternative Fuel/Vehicle for China's Future Road Transport: Life-Cycle Energy Demand and GHG Emissions", Energy Policy, Vol. 38, No. 8, pp. 3943-3956, 2010.
- [4] Moghbeli, H., Halvaei Niasar, A., Langari, R., "New Generation of Passenger Vehicles: FCV or HEV", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp.452-459, Mumbai, India, Dec. 2006.
- [5] Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A., Gay, S., "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design", CRC Press, USA, Nov. 2009.
- [6] Guibert, A., "Batteries and Supercapacitor Cells for the Fully Electric Vehicle", Smart Systems Integration Conference, Brussels, 17 June 2009.
- [7] Trovão, J.P., Santos, V.D.N., Pereirinha, P.G., Jorge, H.M., Antunes, C.H., "Comparative Study of Different Energy Management Strategies for Dual-Source Electric Vehicles", Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Spain, pp. 1-9, 2013.
- [8] Baisden, A.C., Emadi, A., "ADVISOR-Based Model of a Battery and an Ultracapacitor Energy Source for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Trans. on vehicular technology, Vol. 53, No. 1, pp. 199-205, 2004.
- [9] Romaus, C., Gathmann, K., Böcker, J., "Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System for EVs Based on Stochastic Dynamic Programming", IEEE Vehicular Power Propulsion Conf. (VPPC), pp. 1-6, Chicago, USA, Sep. 2011.
- [10] Lin, X. Banvair, H., Anwar, S., Chen, Y. "Optimal Energy Management for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle: Real-Time Controller", American Control Conf. (ACC), pp.5037-5042, Baltimore, USA, June-July 2010.
- [11] Chen, K., Deng, Y., Zhou, F. Sun, G., Yuan, Y. "Control Strategy Optimization for Hybrid Electric Vehicle Based on Particle Swarm and Simulated Annealing Algorithm", Int. Conf. Electric Inform and Control Eng. (ICEICE), pp.2054-2057, Whuan, China, April 2011.
- [12] Yu, Q.M., Wang Y.N., Zhong, Y., "Fuzzy Control Strategy and Simulation of EV with Energy Hybridization", Chinese Journal of Computer Simulation, Vol. 21, No. 9, pp. 144-147, 2004.
- [13] Silva, M.A., De Melo, H.N., Trovao, J.P., Pereirinha, P.G., Jorge, H.M., "An Integrated Fuzzy Logic Energy Management for a Dual-Source Electric Vehicle", IEEE Industrial Electronics Society Conference, IECON, pp. 4564-4569, Vienna, Austria, 2013.
- [14] Chenghui, Z., Qingsheng, S., Naxin, C. Wuhua, L., "Particle Swarm Optimization for Energy Management Fuzzy Controller Design in Dual-Source Electric Vehicle", IEEE Power Electronics Specialists Conference, (PESC), pp. 1405-1410, Orlando, USA, 2007.
- [15] Mohanbhai P.S., Mohanbhai, P.P., "Effective Power and Energy Management for the Dual Source Hybrid Electric Vehicle Based on The Measured Drive Cycle", IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE), pp. 1-6, Delhi, India, 2012.
- [16] Chan T.D., Chau, K.T., "Modern Electric Vehicle Technology", Oxford University Press, SBN 019-850416-0, 2001.
- [17] Kevin M.P., Stephen, Y. "Fuzzy Control", Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA, 1998.
- [18] Reilly, U., Yu, T., Riolo, R., Worzel, B., "Genetic Programming Theory and Practice II", Springer Science Business Media, USA, 2005.
- [19] Xinshun, M., "A New Hybrid Evolution Genetic Algorithm with Laplace Crossover and Power Mutation", Int. Conf. on Computational Intelligence and Security, (CIS), Vol. 2, pp. 88-91, Xian, China, Dec. 2009.
- [20] Alam, S., Kabir, M.W., Islam, M.M., "Self-Adaptation of Mutation Step Size in Artificial Bee Colony Algorithm for Continuous Function Optimization", Int. Conf. on Computer and Information Technology (ICCIT), Vol. 2, pp.69-74, 23-25, Dhaka, Bangladesh, Dec. 2010.
- [21] Yokota, T., Gen, M., Li, Y.X., "Genetic Algorithm for Non-Linear Mixed Integer Programming Problems and its Applications", Computers & Industrial Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 905-917, Sep. 1996.
- [22] Yu, Z., Chen, S., Tong, L., "An Intelligent Energy Management System for Large-Scale Charging Of Electric Vehicles", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 47-53, 2016.
- [23] Pedro, J., Trovão, F., Santos, V.D.N., Antunes, C.H., Pereirinha, P.G., Jorge, H.M., "A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 5, pp. 3223-3233, 2015.
- [24] Lin, X. Hu, M., Song, S., Yang, Y. "Battery-Supercapacitor Electric Vehicles Energy Management using DP Based Predictive Control Algorithm", IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS), pp. 30-35, Orlando, USA, 2014.