

طراحی و توسعه مدیریت انرژی بهینه و همزمان خودروهای هیبرید الکتریکی

هدف مصرف سوخت در بخش حمل و نقل در چند دهه اخیر رو به رشد بوده و موجب افزایش آلودگی و آسیب های زیست محیطی شده است. هدف این پژوهش طراحی یک کنترلر سطح بالا با قابلیت پیاده سازی برای خودروی هیبرید الکتریکی است تا علاوه بر بهینه کردن مصرف سوخت قابلیت رانندگی را نیز در نظر بگیرد. برای نیل به این هدف از کنترل پیش بین غیر خطی استفاده شده است. ابتدا کنترلر برای ورودی مرجع مشخصی طراحی می شود. در مرحله بعد کنترلر برای محدوده وسیعی از ورودی های مرجع تنظیم می شود. مشاهده می شود هدف های کنترلی ارضا می شوند و مصرف سوخت کاهش می یابد.

مسعود روحی^۱
دانشجوی کارشناسی

ارشیا بهرامی مؤید^۲
دانشجوی کارشناسی

امیر تقوی پور^۳
استادیار

واژه های راهنما: خودرو هیبریدی، سیستم مدیریت انرژی، کنترل پیش بین، مصرف سوخت

۱- مقدمه

۱-۱- وضعیت کنونی انرژی

مصرف سرانه انرژی در کشورهای عضو آژانس بین المللی انرژی^۴ از سال (۱۹۸۰) تاکنون به کمترین میزان خود رسیده است. باید در نظر داشت که فواید افزایش بازدهی انرژی تنها به صرفه جویی در هزینه ها محدود نمی شود و بالارفتن امنیت انرژی، افزایش بهره وری صنایع و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای از دیگر فواید این رویه می باشد [۱]. با این وجود هنوز هم بخش بزرگی از انرژی از طریق احتراق سوخت های فسیلی بدست می آید که پیامدهای نامطلوبی دارد که مهمترین آن آلودگی هوا است. آلودگی هوا اثرات نامطلوب متعددی دارد که از جمله ای آن می توان به بیماری های گوناگون، اثرات نامطلوب در بخش کشاورزی، باران های اسیدی، آلاینده ها (گازهای گلخانه ای) و ... اشاره کرد. سازمان بهداشت جهانی بیان داشته است که سالانه ۶/۵ میلیون نفر در جهان به علت بیماری های ناشی از آلودگی هوا جان خود را از دست می دهند که این رقم از مجموع مرگ و

^۱ دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران msdroohi@gmail.com

^۲ دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران arshiabahrami.m@gmail.com

^۳ نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران taghavi@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

^۴ International Energy Agency

میر به خاطر ایدز، سل و تصادفات جاده‌ای بیشتر است [۲]. آژانس بین‌المللی انرژی پیش‌بینی کرده است که ۱۳٪ انرژی مورد نیاز بخش حمل و نقل در سال (۲۰۳۰) از نفت و گاز تامین می‌شود [۲]. از جمله راه‌هایی که برای کاهش مصرف سوخت یا کاهش آلاینده‌ها پیشنهاد می‌شود می‌توان به استفاده از خودروهای هیبریدی، خودروهای برقی و خودروهای پیل سوختی اشاره کرد. ساختارهای مختلفی برای سیستم محرکه خودروهای هیبریدی در نظر گرفته می‌شود که پرکاربردترین آنها ساختارهای سری، موازی و سری-موازی^۱ هستند.

۱-۲- سیستم مدیریت انرژی^۲

راهکارهایی که توزیع توان را در سیستم انتقال قدرت کنترل می‌کنند را راهکارهای مدیریت انرژی^۳ یا کنترل نظارتی^۴ می‌نامند [۳]. این راهکارها را می‌توان به دو دسته راهکارهای ابتکاری^۵ یا بر مبنای قانون و راهکارهای بهینه یا بر مبنای مدل تقسیم کرد.

عملکرد راهکارهای ابتکاری که هدف آنها کاهش مصرف سوخت قابل دستیابی است، نسبت به تنظیم کردن قوانین بسیار حساس است. اهمیت این حساسیت زمانی است که تنظیم انجام شده مختص سیکل و الگوی رانندگی استاندارد است در حالی که در غالب موارد این چرخه با چرخه رانندگی که در واقعیت رخ می‌دهد تفاوت چشمگیری دارد و بنابراین نرخ مصرف سوخت نسبت به آنچه می‌توانست باشد، افزایش پیدا می‌کند. از روش‌های مرسوم ابتکاری روش مبتنی بر منطق فازی است که توسط شوتن و همکاران [۴] و ون و همکاران [۵] استفاده شده است. در این روش‌ها کنترلرها بر مبنای رفتارهای قابل انتظار سیستم محرکه طراحی می‌شوند. این روش‌ها نیازمند تنظیمی هستند که به شدت به تجربه استوار است. علاوه بر این پارامترهای کنترلی که تحت شرایطی خاص به خوبی پاسخ می‌دهند، می‌توانند تحت شرایطی دیگر رفتاری بسیار ضعیف از خود نشان دهند. یکی از راه حل‌ها برای رفع این مشکلات استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای مدل است که از توابع هدف مناسب استفاده می‌کنند [۳].

راهکارهای بهینه بر مبنای تئوری کنترل بدست آمده اند و نیازمند یک مدل فیزیکی مناسب از سیستم تولید توان هستند. این راهکار معمولاً در پی کمینه کردن یک تابع هزینه موضوعی در هر واحد زمان است تا سیگنال کنترل را بدست آورد. راهکار بر مبنای مدل، خود به دو روش حل عددی و تحلیلی تقسیم می‌شود. در روش‌های عددی مانند برنامه‌ریزی پویا^۶ [۶ و ۷]، الگوریتم ژنتیک [۸] و برنامه‌ریزی تصادفی پویا^۷ [۹ و ۱۰] تمامی سیکل‌های رانندگی در نظر گرفته شده و پاسخ بهینه سراسری به صورت عددی یافت می‌شود. اما در روش‌های تحلیلی سعی می‌شود تا با توسعه معادلات مسئله یک پاسخ تحلیلی بدست آید یا حداقل معادلاتی بدست آورند تا به حل عددی سرعت بخشند [۱۱]. این راهکارها توسط مؤلفین [۱۵-۱۲] توسعه یافتند. بیشتر این

¹ power-split

² Energy Management system (EMS)

³ energy management strategies

⁴ supervisory control

⁵ heuristic

⁶ Dynamic Programming

⁷ Stochastic Dynamic Programming

مقالات از راهبرد کمینه‌سازی مصرف معادل^۱ یا اشکال دیگری از این راهبرد بهره برده‌اند. به طور مثال سکیارتا و همکاران [۱۴] سعی کرده‌اند تا راهبرد کمینه‌سازی مصرف معادل را به گونه‌ای بکار بندد که نیازی به اطلاعات زمان پیشرو نباشد. موساردو و همکاران [۱۵] نیز به ادعای خود با تلفیق برنامه‌ریزی پویا و راهبرد کمینه‌سازی مصرف معادل، راهبرد کنترلی بهبود یافته‌ای را بدست آورده‌اند که بی درنگ است و هم پاسخی غیر محلی ارائه می‌دهد. همان‌گونه که بیان شد این روش‌های کمینه‌سازی نیازمند مدل سیستم تولید توان هستند و براحتی قابل تنظیم می‌باشند. هرچند این راهکارها نسبت به راهکارهای بر مبنای قانون، نیازمند توان محاسباتی بیشتری هستند زیرا باید بهینه‌سازی برخط^۲ را به صورت هماهنگ انجام بدهند.

۱-۳- نوآوری و هدف پروژه

در این پروژه از کنترل پیش بین غیرخطی به عنوان راهکار مدیریت انرژی برای خودروی هیبرید الکتریکی با ساختار سری-موازی استفاده می‌شود. فکری و سمپادنارایانان [۱۶ و ۱۷] از کنترل پیش بین خطی برای ساختار موازی خودروهای هیبریدی استفاده کرده‌اند و مدل غیرخطی را حول نقطه عملکرد خطی سازی کرده‌اند. از روش کنترل پیش بین در [۱۸] برای ساختار سری-موازی استفاده شده است و مدل در هر زمان نمونه خطی سازی می‌شود. در پروژه حاضر با استفاده از کنترل پیش بین، مدل غیر خطی سیستم انتقال قدرت کنترل شود و پاسخ بهینه برای یک سیکل رانندگی معین بدست آید. کنترلر بدست آمده قابلیت پیاده‌سازی نخواهد داشت زیرا به سیکل رانندگی وابسته است. لذا برای اینکه کنترلر قابلیت پیاده‌سازی بیابد، برای محدوده مشخص از ورودی‌های مرجع استفاده می‌شود. ورودی‌های کنترلی را در قالب یک نقشه ذخیره خواهد شد تا برای پیاده‌سازی به صورت هماهنگ قابل استفاده باشد. همچنین نحوه استفاده از کنترل مرتبه بالا در این مسئله شرح داده خواهد شد و کنترلر مناسب برای یک سیکل رانندگی مشخص بدست آورده شده و پس از آن نتایج آن بررسی می‌شوند. سپس برای اینکه کنترلر قابلیت پیاده‌سازی بیابد نتایج به صورت یکسری جداول تهیه می‌شود و نتایج پیاده‌سازی آن روی سیکل رانندگی تحلیل می‌شود. در ابتدا توضیحات مختصری درباره‌ی روش کنترل پیش بین ارائه می‌شود. سپس مدل سازی انجام می‌شود و به کمک روش کنترل پیش بین، یک سیستم مدیریت انرژی را توسعه می‌دهیم و با انجام شبیه سازی نشان می‌دهیم که استراتژی کنترلی که توسعه داده ایم، می‌تواند مصرف سوخت را تا حد قابل توجهی کاهش دهد.

۲- کنترل پیش بین

کنترل پیش بین روشی کنترلی است که به صورت صریح از مدل فرایند برای بدست آوردن سیگنال کنترلی استفاده می‌کند. مدل مبنا^۳ بودن این روش اهمیت مدل سازی به اندازه کافی دقیق و ساده را دوچندان می‌کند. ایده اصلی در کنترل پیش بین این است که نه تنها در لحظه جاری بلکه در بازه ای از آینده نیز متغیرهای کنترلی در نظر گرفته شده و با توجه به آنها ورودی‌های کنترلی محاسبه می‌شوند. کنترل پیش بین نیز با در

¹ Equivalent consumption minimization strategy (ECMS)

² online

³ Model Based

نظر گرفتن محدوده ای از آینده‌ی مسیر مرجع و اغتشاشات، ورودی کنترلی را تعیین می‌کند. از مزیت‌های اصلی کنترل پیش‌بین، می‌توان به کمینه کردن خطای کنترلی در چند گام بعد از لحظه جاری، کاهش دادن سیگنال کنترل در چند گام بعد از لحظه جاری و در نظر گرفتن محدودیت‌های سیگنال کنترلی، سیگنال خروجی و متغیرهای حالت اشاره کرد [۱۹].

در الگوریتم کنترلی کنترل پیش‌بین ابتدا بهینه‌گر با استفاده از شرایط اولیه و سیگنال‌های مرجع، ورودی کنترلی را برای محدوده کنترلی تعیین می‌کند. با توجه به استراتژی منتخب ورودی کنترلی وارد سیستم شده و خروجی آن به همراه ورودی‌های کنترلی وارد کنترلر پیش‌بین می‌شوند تا متغیرهای کنترلی برای محدوده پیش‌بینی محاسبه شوند. سپس بهینه‌گر با توجه به سیگنال‌های مرجع و متغیرهای پیش‌بینی شده ورودی‌های کنترلی را تعیین کرده و الگوریتم تکرار می‌شود.

۲-۱- تابع هزینه

تابع هزینه درجه دوم برای یک سیستم تک ورودی- تک خروجی به قرار زیر است:

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \lambda_{yi} [y_r(k+i) - \hat{y}(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \lambda_{uj} \Delta u^2(k+j-1) \quad (1)$$

در این رابطه λ وزن هر جمله می‌باشد N_1 و N_2 آغاز و پایان محدوده پیش‌بینی و n_u طول محدوده کنترل است. $|k|$ نیز بدین معنی است که پیش‌بینی‌ها بر اساس اطلاعاتی است که تا لحظه k بدست آمده است. همان‌گونه که مشخص است تابع هزینه از دو قسمت تشکیل شده است [۱۹]:

- هزینه خطای کنترل در محدوده پیش‌بینی
- هزینه افزایش سیگنال کنترلی در محدوده کنترل

هزینه افزایش سیگنال کنترلی در محدوده کنترل هزینه خطای کنترل در محدوده پیش‌بینی کمینه کردن قسمت اول باعث کاهش خطای کنترل و کمینه کردن قسمت دوم موجب می‌شود که تلاش کنترلی افزایش محدودی داشته باشد. پس از محدوده کنترل که یعنی بعد از n_u گام است، ورودی کنترلی ثابت نگاه داشته می‌شود. این بدین معنی است که اگر سیگنال مرجع مقداری ثابت باشد، آخرین مقداری که ورودی کنترلی دارد معادل وضعیت پایای ورودی کنترلی خواهد بود.

۲-۲- راهبرد کنترلی محدوده بازگشتی^۱

هر چند بهینه‌گر ورودی کنترلی را برای تمام محدوده کنترل بدست می‌آورد، ولی بر اساس راهبرد کنترل محدوده بازگشتی، تنها ورودی کنترلی مربوط به گام حاضر اعمال می‌شود. به بیان دیگر ورودی کنترلی برای گام‌های k ، $k+1$ ، ...، $k+n_u-1$ محاسبه می‌شود ولی تنها $\Delta u(k)$ به سیستم اعمال می‌شود. در گام بعدی از آخرین اندازه‌گیری‌های متغیرهای کنترلی و سیگنال مرجع استفاده می‌شود تا ورودی‌های کنترلی برای محدوده کنترلی جدید محاسبه شوند. این فرایند را که به صورت هماهنگ انجام می‌گیرد راهبرد کنترل محدوده بازگشتی گویند. مزیت این استراتژی در این نکته است که در هر گام، تغییرات مدل، سیگنال مرجع، اغتشاشات

¹ Receding Horizon Control Strategy

و یا حتی قیدها که در طول محدوده پیش‌بینی رخ می‌دهند در نظر گرفته می‌شوند. در بخش بعد جهت طراحی کنترلر مدل مبنا یک مدل به نسبت دقیق و ساده از سیستم انتقال قدرت ارائه می‌شود.

۳- مدل سازی خودرو هیبریدی

۳-۱- دینامیک طولی

برای دستیابی به یک مدل کنترلی، خودرو به صورت یک جرم ذره‌ای در نظر گرفته شده است که با محیط خود تبادل نیرو (توان و انرژی) دارد تا بتوان نهایتاً توان و انرژی لازم را برای اینکه خودرو با یک سرعت مشخص حرکت کند بدست آورد. برای فهم بهتر دینامیک طولی و ویژگی‌های خودروی هیبریدی، این روش به نظر کاربردی‌تر رسیده است [۱۱]. معادله دینامیک طولی خودرو به صورت معادله (۲) خواهد بود:

$$M_{veh} \frac{dv_{veh}}{dt} = F_{inertia} = F_{trac} - F_{roll} - F_{aero} - F_{grade} \quad (2)$$

معادله (۲) را با اندکی جابجایی میتوان برای محاسبه نیروی کشنده به شکل معادله (۳) مرتب کرد:

$$F_{trac} = F_{inertia} + F_{grade} + F_{roll} + F_{aero} \quad (3)$$

همچنین با ضرب کردن معادله (۳) در سرعت، معادله دینامیک طولی به معادله (۴) تبدیل می‌شود:

$$P_{trac} = P_{inertia} + P_{grade} + P_{roll} + P_{aero} \quad (4)$$

در این رابطه P_{trac} بیانگر توان کششی یا کشنده است که مقدار مثبت آن توسط قوای محرکه برای پیشرانندگی خودرو تولید می‌شود و مقدار منفی آن توسط ترمز ایجاد می‌شود. چون توان کشنده تحت اثر توان قوای محرکه و توان ترمز است، می‌توان معادله دینامیک طولی را به شکل زیر درآورد:

$$P_{trac} = P_{pwt} - P_{brk} \quad (5)$$

که البته توان قوای محرکه نیز از توان تولیدی موتور احتراق داخلی و موتور الکتریکی تامین می‌شود. در نتیجه رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$P_{trac} = P_{eng} + P_{bat} - P_{brk} \quad (6)$$

نهایتاً معادله دینامیک طولی با استفاده از تعریف تخمین توان $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ به شکل زیر درمی‌آید:

$$\Delta E_{trac} = \Delta t(P_{eng} + P_{bat} - P_{brk}) \quad (7)$$

همچنین مقادیر و ثابت‌های خودرو تویوتا پریوس در جدول (۱) طبقه بندی شده است.

جدول ۱- مقادیر ثابت‌ها و ضرایب

مقدار	ثابت‌ها
1300 kg	M
1.2 kg/m ³	ρ_{air}
1.8 m ²	A_f
0.32	C_d
0.013	C_r
9.81 m/s ²	g

۳-۲- باتری

یکی از نکات بسیار کلیدی توسعه تکنیک‌های دقیق برای تخمین وضعیت شارژ باتری^۱ در خلال عملکرد آن است [۳]. ظرفیت یک باتری عموماً با واحد Ah بیان می‌شود که میزان انتگرال جریانی که تحت شرایطی خاص می‌دهد را نشان می‌دهد. وضعیت شارژ باتری متغیر بدون واحدی است که نشانگر نسبت شارژ باقی‌مانده در باتری به شارژ نامی باتری است:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{nom}} \quad (۸)$$

نرخ تغییر وضعیت شارژ باتری، جریان باتری را به شارژ نامی مرتبط می‌کند:

$$S\dot{O}C = \frac{I}{Q_{nom}} \quad (۹)$$

در صورتی که دینامیک ولتاژ نادیده گرفته شود و اطلاعات آزمون باتری در دسترس نباشد، مدل ساده باتری با مقاومت R_{bat} ثابت و بدون هیچ شاخه R-C قابل قبول‌ترین مدل خواهد بود [۳]. معادله حاکم بر مدل ساده باتری، به قرار زیر می‌باشد:

$$P_{bat} = V_L \cdot I = V_{oc}I - R_{bat}I^2 \quad (۱۰)$$

اگر جریان تابعی از توان در نظر گرفته شود، با حل معادله (۱۰)، معادله (۱۱) بدست خواهد آمد:

$$I = \frac{V_{oc}}{2R_{bat}} - \sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{2R_{bat}}\right)^2 - \frac{P_{bat}}{R_{bat}}} \quad (۱۱)$$

و نهایتاً از ترکیب معادلات (۹) و (۱۱) معادله نرخ تغییر وضعیت شارژ باتری به قرار زیر می‌شود:

$$S\dot{O}C = - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}Q_{nom}} \quad (۱۲)$$

در باتری خودرو تویوتا پریوس^۲ مقدار V_{oc} برابر با ۲۰۷V، R_{bat} برابر با 0.8Ω و Q_{nom} برابر با ۲۱.۲۵ Ah است.

۳-۳- معادلات کنترل محور سیستم

با توجه به معادلات فوق می‌توان مدل کنترل محور را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$E(k+1) = E(k) + P_{eng}(k) + P_{bat}(k) - P_{brk}(k) \quad (۱۳)$$

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{bat}P_{bat}(k)}}{2R_{bat}Q_{nom}} \quad (۱۴)$$

$$Y(k) = \begin{bmatrix} E(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

در این معادلات $X = \begin{bmatrix} E(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix}$ متغیرهای حالت، $u = \begin{bmatrix} P_{eng}(k) \\ P_{bat}(k) \\ P_{brk}(k) \end{bmatrix}$ ورودی‌های کنترلی و

^۱ State of Charge (SOC)

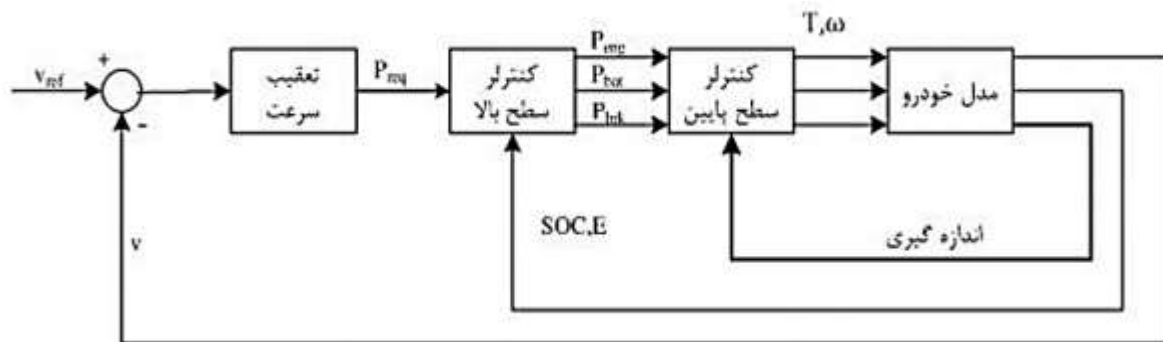
^۲ Toyota Prius 1.8l 2zr-fxe

باتری ولتاژ بالا و ترمز مکانیکی هستند. مسلماً به دلیل غیر خطی بودن یکی از معادلات امکان نوشتن معادلات در فضای حالت وجود ندارد. اکنون با استفاده از این معادلات می توان کنترل را طراحی نمود.

۴- راهبرد کنترلی

کنترل کردن یک خودروی هیبریدی در دو سطح کنترل سطح پایین^۱ و سطح بالا^۲ صورت می گیرد. کنترل سطح پایین وظیفه دارد هر یک از اجزای سیستم انتقال قدرت را کنترل کند که معمولاً از کنترل فیدبک کلاسیک برای این منظور بهره برده می شود. کنترل سطح بالا، سیستم مدیریت انرژی^۳ نامیده می شود. در خودروی هیبریدی لازم است تا یک تصمیم دیگر نیز گرفته شود و آن این است که هر یک از منابع انرژی چه میزان از انرژی درخواستی راننده را تامین کنند. به همین دلیل نیاز است تا یک کنترلر بین راننده و کنترلر سطح پایین قرار بگیرد. همان گونه که بیان شد کنترلر سطح بالا وظیفه دارد توزیع توان بهینه میان منابع انرژی را تعیین کند.

حال اینکه چگونه توزیع توانی بهینه در نظر گرفته شود به کاربری خودرو بستگی خواهد داشت ولی عمدتاً راهبردهای کنترلی در پی آن هستند که مصرف سوخت را کاهش دهند. البته هدفهای کنترلی دیگری نظیر کاهش آلایندگی، افزایش طول عمر باتری، افزایش لذت رانندگی و یا مصالحه‌ای بین این اهداف را نیز می توان در نظر گرفت. در شکل (۱) دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی یک خودروی هیبریدی نمایش داده شده است. اولین بلوک برای تعقیب سرعت می باشد که البته در موارد واقعی راننده نقش آن را به عهده دارد و در اینجا می توان آن را جایگزین راننده دانست. در بلوک تعقیب سرعت رفتار یک راننده شبیه سازی می شود. بلوک های بعدی نیز به ترتیب کنترلر سطح بالا، کنترلر سطح پایین و مدل اجزای سیستم قوای محرکه می باشند که در خصوص وظیفه آنها توضیح داده شد. هدفهای کنترلی کاهش مصرف سوخت و ارائه قابلیت رانندگی^۴ مناسب یا همان تامین نیاز راننده است. کاهش مصرف سوخت هدف اصلی در این پروژه است، پس این نکته به هنگام تنظیم وزن آن در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۱- دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی خودرو

¹ Low level control

² High level control

³ Energy Management System (EMS)

⁴ Drivability

در یک خودروی هیبریدی تنها واحد مصرف کننده سوخت، موتور احتراق داخلی است. بنابراین اگر توانی که از موتور احتراق داخلی گرفته می شود کاهش یابد، سوخت مصرفی نیز کاهش خواهد یافت. برای ارائه قابلیت رانندگی مناسب باید عبارتی را به تابع هزینه افزود که اختلاف میان توان تولیدی سیستم قوای محرکه و توان درخواستی را کاهش دهد. اگر بازه زمانی برابر واحد در نظر گرفته شود انرژی حرکتی E_{req} با توان حرکتی P_{req} یکسان خواهد بود. بنابراین عبارت مربوط به قابلیت رانندگی، اختلاف انرژی تولیدی از انرژی درخواست شده در نظر گرفته می شود تا سعی شود در حد ممکن نیاز راننده پاسخ گفته شود. بدین ترتیب تابع هزینه در طول یک دوره پیش بینی به قرار زیر در خواهد آمد:

$$\min \sum_{j=1}^{N_p} \{ [E_j - E_{req,j}] Q [E_j - E_{req,j}] + P_{eng} R P_{eng} \} \quad (16)$$

مسئله حاضر قیدهایی نیز دارد که برخی از آنها نظیر مقدار نهایی سطح شارژ^۱، سراسری^۲ و برخی دیگر مانند بیشینه و کمینه توان موتور احتراق داخلی محلی^۳ هستند. قید سراسری اعمال شده روی وضعیت شارژ باتری به این صورت است که مقدار نهایی SOC باید برابر یک مقدار از پیش تعیین شده باشد به عبارتی [۱۱]:

$$SOC(t_f) - SOC_{target} = 0 \quad (17)$$

در خودروهای نگهدارنده شارژ^۴، مجموع انرژی رد و بدل شده در باتری در طی یک سیکل رانندگی باید صفر باشد و این بدین معناست که وضعیت شارژ باتری در ابتدا و انتهای سیکل باید یکسان باشد، یعنی:

$$SOC_{target} = SOC(t_0) \quad (18)$$

اما در خودروهای PHEV که دارای باتری بزرگ هستند و بوسیله منبع انرژی بیرونی شارژ می شوند، مجموع انرژی رد و بدل شده مثبت خواهد بود و به طور طبیعی باید وضعیت نهایی شارژ از وضعیت ابتدایی آن در سطح پایین تری باشد. SOC_{ref} یا به صورت خطی از یک سطح بالاتر به یک سطح پایین تر نزول پیدا می کند و یا ابتدا سیستم قوای محرکه در حالت الکتریکی مطلق قرار می گیرد تا وضعیت شارژ باتری به حد معینی برسد و پس از آن ثابت می ماند. قیدهایی محلی بر روی حالتها و متغیرهای کنترلی اعمال می شوند. قید محلی که به وضعیت شارژ باتری اعمال می شود با این هدف است که SOC را در بازه ی خاصی حفظ کند. این در حالی است که قیدهایی محلی اعمالی به متغیرهای کنترلی به خاطر محدودیت های فیزیکی موجود روی آنها است. با این تفاسیر، قیدهایی محلی به شکل نامعادلات (۱۹) الی (۲۲) نوشته می شوند.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (19)$$

$$P_{eng,min} \leq P_{eng}(t) \leq P_{eng,max} \quad (20)$$

$$P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max} \quad (21)$$

$$P_{brk,min} \leq P_{brk}(t) \leq P_{brk,max} \quad (22)$$

¹ SOC

² Global Constraint

³ Local Constraint

⁴ Charge Sustaining

در معادله (۱۷) یک قید سخت^۱ اعمال شده است تا مقدار نهایی وضعیت شارژ باتری برابر مقدار اولیه اش باشد. این قید را می توان به صورت یک قید نرم^۲ در مسئله قرار داد به این ترتیب که سعی شود با افزودن یک عبارت به تابع هزینه سعی شود تا اختلاف وضعیت شارژ باتری SOC(t) از حالت مطلوب آن کاهش یابد. به این ترتیب تابع هزینه به قرار زیر در می آید:

۶۴

$$\min \sum_{j=1}^{N_p} \{ Y^T Q Y + P_{eng,j} R P_{eng,j} \} \quad (23)$$

که در آن $Q = \begin{bmatrix} w_1 & 0 \\ 0 & w_2 \end{bmatrix}$ و $Y = [SOC_j - SOC_{ref,j} \cdot E_j - E_{ref,j}]^T$ است. استفاده از قید نرم تابع هزینه را تغییر می دهد تا مقدار نهایی وضعیت شارژ باتری به مقدار مطلوب نزدیک شود ولی لزوماً برابر نخواهد شد. قرارگیری اختلاف وضعیت شارژ باتری از مقدار مطلوب در یک معادله درجه دو باعث می شود مقدار این عبارت بدون توجه به علامت آن کاهش یابد. هدف کنترلی تعیین ورودی های کنترلی است به گونه ای که تابع هزینه کمینه شده و در عین حال قیدها نیز رعایت شوند:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + U^T R U = \sum_{j=1}^{N_p} (SOC(K + j) - SOC_{ref,j}) \omega_{SOC} (SOC(K + j) - SOC_{ref,j}) + (E(K + j) - E_{ref,j}) \omega_E ((E(K + j) - E_{ref,j}) + P_{eng,j} \omega_{eng} P_{eng,j}) \quad (24)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(k + j) \leq SOC_{max} \quad (25)$$

$$P_{eng,max} \leq P_{eng,j} \leq P_{eng,min} \quad (26)$$

$$P_{bat,min} \leq P_{bat,j} \leq P_{bat,max} \quad (27)$$

$$P_{brk,min} \leq P_{brk,j} \leq P_{brk,max} \quad (28)$$

پس از چند سعی و خطا این نتیجه حاصل شد که بهتر است محدوده بهینه سازی از ۱ تا ۱۰ و محدوده کنترل از ۱ تا ۴ باشد. فرض شده است که اطلاعاتی از آینده در دسترس نیست، بنابراین ورودی های مرجع در هر لحظه تا ۱۰ گام آینده آن ثابت فرض می شوند. در نتیجه می توان زیروند J را برای E_{ref} و SOC_{ref} نادیده گرفت. همچنین تابع هزینه، برای تفهیم راحت تر مسئله به صورت ماتریس بسط داده می شود.

$$J = [SOC(K + 1) - SOC_{ref} \dots SOC(K + 10) - SOC_{ref}] \omega_{soc} \begin{bmatrix} SOC(K + 1) - SOC_{ref} \\ \vdots \\ SOC(K + 10) - SOC_{ref} \end{bmatrix} + [E(K + 1) - E_{ref} \dots E(K + 10) - E_{ref}] \omega_E \begin{bmatrix} E(K + 1) - E_{ref} \\ \vdots \\ E(K + 10) - E_{ref} \end{bmatrix} + [P_{eng,1} \dots P_{eng,10}] \omega_{eng} \begin{bmatrix} P_{eng,1} \\ \vdots \\ P_{eng,10} \end{bmatrix} \quad (29)$$

فرض می شود که محدوده کنترل $N_c=4$ است. به همین دلیل ω_5 تا ω_{10} هر ماتریس وزنی به گونه ای انتخاب می شوند که تلاش کنترلی برای گام های ۵ تا ۱۰ به طرز چشمگیری کاهش یابد. سایر وزن ها نیز در جهت نیل

¹ Hard Constraint

² Soft Constraint

به اهداف زیر با اولویت ترتیب تنظیم می‌شوند.

۱- کاهش مصرف سوخت: وزنهای مربوط به P_{eng} نسبت به ترم‌های دیگر به گونه‌ای انتخاب شوند که در اولویت بودن کاهش مصرف سوخت تضمین شود. در کل سعی می‌شود به گونه‌ای تنظیم شود که تا حد امکان، توان از باتری گرفته شود و تنها در شرایطی توان از موتور احتراق داخلی گرفته شود که وضعیت شارژ باتری نزدیک به حد پایین خود باشد یا قید محلی باتری رعایت نشده و انرژی درخواستی بیشتر از توان باتری باشد.

۲- ارائه قابلیت رانندگی مناسب: پس از کاهش مصرف سوخت در اولویت بعدی قرار دارد. بنابراین باید سعی شود وزن آن به گونه‌ای تنظیم شود که در عین تامین درخواست راننده باعث افزایش مصرف سوخت نشود.

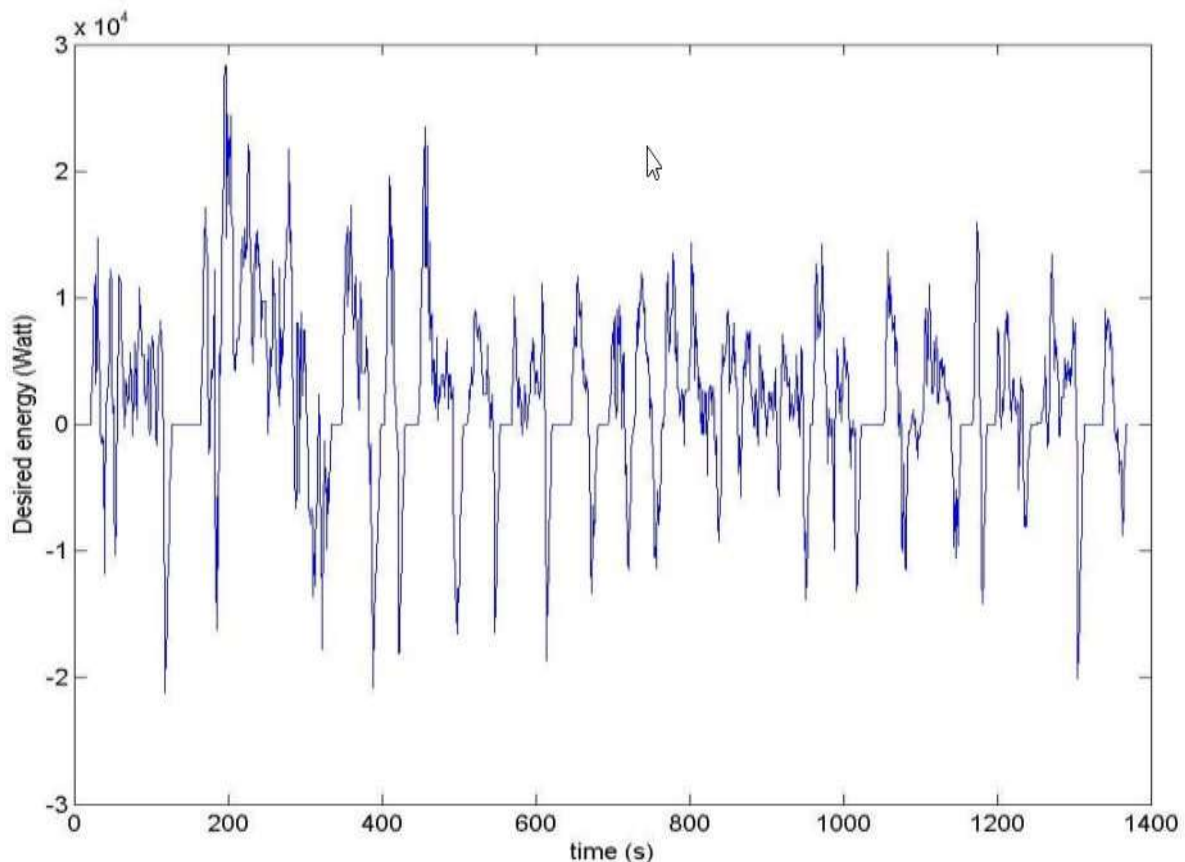
۳- اختلاف وضعیت شارژ باتری از وضعیت نهایی: نسبت به دو جمله قبل از اهمیت کمتری برخوردار است ولی به خودی خود مهم می‌باشد. این نکته باعث می‌شود که وزن آن به گونه‌ای تنظیم شود که نهایتاً SOC به مقدار مطلوب نهایی نزدیک شود. حال اینکه نسبت این وزن‌ها چه میزان باشد پس از سعی و خطا مشخص می‌شود. نکته دیگر اینکه لازم است تا تمام جمله‌ها در یک مقیاس برابر در تابع هزینه جمع شوند. وضعیت شارژ باتری، خود در بازه $[0/1]$ تغییر می‌کند. برای هم مقیاس کردن سایر جملات با وضعیت شارژ باتری، آنها بر بزرگترین مقدار ممکن خود تقسیم می‌شوند تا بازه تغییرات آنها نیز به $[0/1]$ بدل شود. بدین ترتیب وزنهای جملات مربوط به قابلیت رانندگی بر 83390 (بزرگترین مقدار تفاوت ممکن بین انرژی تولیدی و انرژی مرجع) تقسیم می‌شوند و وزنهای جملات مربوط به توان موتور احتراق داخلی نیز بر 70000 تقسیم می‌شوند که حداکثر توان ممکن موتور احتراق داخلی است. مسئله اکنون یک مسئله بهینه‌سازی است که هم تابع هزینه آن و هم یکی از قیدهای آن غیر خطی هستند. برای حل این مسئله از دستور `fmincon` در نرم‌افزار `MATLAB` بهره برده می‌شود. قیدهای غیر خطی نیز به صورت یک تابع دیگر باید ذخیره شوند. الگوریتم بهینه‌سازی نقطه داخلی^۱ برای استفاده برگزیده می‌شود. با دادن شرایط اولیه به `fmincon`، ورودی‌های کنترلی بهینه محاسبه می‌شوند. به خاطر استفاده از راهبرد کنترلی حوزه بازگشتی، تنها ورودی‌های کنترلی محاسبه شده برای گام اول به عنوان خروجی کنترل انتخاب می‌شوند و به سیستم داده می‌شوند. خروجی سیستم نیز همان‌گونه که پیشتر بیان شد، `E` و `SOC` هستند که به عنوان `E1` و `SOC1` در گام بعد مورد استفاده واقع می‌شوند. هنگامی که یک ورودی مرجع و یک شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شود، وزن‌ها برای این ورودی مرجع و شرایط اولیه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که هدف‌های کنترلی ارضا شوند. اما با در نظر گرفتن ورودی مرجع یا شرایط اولیه متفاوت و همان وزن‌های سابق، شاید هدف‌های کنترلی به خوبی ارضا نشوند. از همین رو لازم است تا وزن‌ها دوباره تنظیم شوند. با در نظر گرفتن یک سیکل رانندگی به عنوان ورودی مرجع، می‌توان وزن‌ها را برای بازه وسیعی از ورودی‌های مرجع و شرایط مختلف تنظیم کرد که طبیعتاً در این صورت عملکرد کنترلر برای بازه وسیع‌تری از ورودی‌های مرجع و شرایط اولیه قابل قبول خواهد بود.

¹ Interior Point

۵- شبیه سازی

سیکل رانندگی مورد استفاده در این مطالعه، سیکل UDSS است. برای استفاده از این سیکل به عنوان ورودی مرجع لازم است تا اطلاعات آن به جای سرعت در حوزه انرژی باشد. برای اینکار لازم است تا سرعت در هر لحظه به کمک معادله دینامیک طولی (معادله ۲) به انرژی تبدیل شود. با در نظر گرفتن بازه زمانی واحد بین هر دو گام و V برابر سرعت متوسط بین هر دو گام پی‌درپی در نظر گرفته می‌شود. نهایتاً شکل (۲) به عنوان نمایه انرژی بر حسب زمان بدست می‌آید. برای ورودی مرجع SOC_{ref} نیز، در صورتی که خودرو نگهدارنده شارژ فرض شود، SOC_{ref} در تمام طول سیکل برابر مقدار مطلوب نهایی خواهد بود و اگر خودرو PHEV فرض شود SOC_{ref} از 0.9 تا 0.3 به صورت خطی کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد، کاهش مصرف سوخت از اهمیت بیشتری برخوردار است و پس از آن تامین درخواست راننده و نهایتاً وضعیت شارژ باتری از اهمیت برخوردارند. با همین پیش‌فرض بر اساس اولویت مقدار ω_{eng} از ω_E بیشتر و ω_E از ω_{SOC} بیشتر انتخاب می‌شود. جهت دستیابی به عملکرد مناسب کنترلر نیاز به تنظیم پارامترهای وزنی فوق است. پس از بررسی نتایج اولین تلاش، مشاهده می‌شود که اختلاف انرژی از انرژی مرجع بسیار زیاد و غیر قابل قبول است. همچنین وضعیت شارژ باتری مرجع 0.5 در نظر گرفته شده است و در پایان سیکل تلاش قابل قبولی برای نیل به این وضعیت مشاهده نمی‌شود. لذا بدون توجه به میزان مصرف سوخت لازم است تا مقدار و افزایش یابند. مقایسه $E-E_{ref}$ تلاش اول با تلاش دوم نشان می‌دهد که قابلیت رانندگی بهبود یافته است ولی وضعیت شارژ باتری همچنان نتیجه مطلوبی ندارد. بدین ترتیب ω_E باید



شکل ۲- نمایه انرژی بر حسب زمان

مقداری افزایش یابد ولی ω_{SOC} افزایش قابل ملاحظه‌ای نیاز دارد. همچنین از ω_{eng} اندکی کاسته خواهد شد تا سهم موتور احتراق داخلی در شارژ باتری پررنگ‌تر شود. در حالت کلی نتایج بدست آمده بسیار مطلوب هستند. درخواست راننده تامین می‌شود و وضعیت شارژ باتری نیز پس از طی ۸۰۰ ثانیه به وضعیت مرجع می‌رسد. ولی با مقایسه توان تولیدی موتور احتراق داخلی بسیار افزایش یافته است و این امر به افزایش مصرف سوخت منجر خواهد شد. بنابراین در تلاش‌های بعدی سعی می‌شود تا مصالحه‌ی بهتری بدست آید. برای بدست آوردن نتایج بهتر تنها ω_{SOC} دستخوش تغییر می‌شود.

کنترلر طراحی شده برای یک سیکل رانندگی مشخص تنظیم شده است. بنابراین دور از انتظار نیست که در یک سیکل دیگر یا یک کاربرد عملی، هر کدام از هدف‌های کنترلی ارضا نشوند. بنابراین یک مشکل برای پیاده‌سازی، امکان غیر بهینه بودن کنترلر است. از سوی دیگر مدت زمانی که کنترلر برای بهینه‌سازی طی می‌کند مانع از استفاده آن در حالت هماهنگ است. به بیانی شفاف‌تر در مدت زمانی که کنترلر در حال محاسبه ورودی‌های کنترلی است، ورودی مرجع به دلیل گذشت مدت زمان امکان دارد تغییر داشته باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این کنترلر به این شکل قابلیت پیاده‌سازی نخواهد داشت و حتی در صورت استفاده از پردازنده‌ای قوی برای حل مشکل هماهنگ بودن، مشکل بهینه نبودن پاسخ‌ها حل نخواهد شد. برای برطرف کردن این مشکلات، سعی می‌شود تا وزن‌ها به گونه‌ای تنظیم شوند که کنترلر بتواند برای تمام ورودی‌های مرجع و شرایط اولیه، پاسخی بهینه بیابد. با ذخیره کردن این پاسخ‌ها در قالب یک جدول میتوان مشکل ناهماهنگ بودن کنترلر را نیز برطرف کرد، زیرا پس از اینکه راننده درخواست توان یا انرژی می‌کند، کنترلر تنها با یک درون یابی در جدول می‌تواند پاسخ بهینه را بدست دهد.

با در نظر گرفتن حالت‌های کاربردی، انرژی مرجع از ۵۰۰۰۰ - ژول تا ۵۰۰۰۰ ژول و بازه‌ی وضعیت شارژ باتری مرجع از ۰/۳ تا ۰/۹ فرض می‌شود. همچنین شرایط اولیه برای انرژی همانند انرژی مرجع از ۵۰۰۰۰ - ژول تا ۵۰۰۰۰ ژول تغییر می‌کند ولی شرایط اولیه برای وضعیت شارژ باتری از ۰/۲ تا ۰/۹ تغییر می‌کند. روند تشکیل جدول بدین ترتیب است که انرژی مرجع و وضعیت شارژ باتری مرجع و همچنین انرژی اولیه و وضعیت شارژ باتری اولیه به چند قسمت تقسیم می‌شوند. سپس یک ورودی مرجع انتخاب شده و مسئله برای تمام شرایط اولیه حل می‌شود و پاسخ‌ها ذخیره می‌شوند و همین روند به صورت حلقه‌وار برای تمام ورودی‌های مرجع تکرار می‌شود. به طور مثال در این پروژه E_{ref} از ۵۰۰۰۰ - ژول با فاصله ۱۰۰۰۰ ژول افزایش می‌یابد و SOC_{ref} از ۰/۳ با فاصله ۰/۱ افزایش می‌یابد. همچنین $E1$ از ۵۰۰۰۰ - ژول با فاصله ۵۰۰۰ ژول و $SOC1$ از ۰/۲ با فاصله ۰/۵ افزایش می‌یابند. بدین ترتیب کل ناحیه مورد بررسی، بر مبنای وضعیت چهار پارامتر E_{ref} ، SOC_{ref} ، $E1$ و $SOC1$ به چهار وضعیت تقسیم می‌شود:

الف - $E1$ از E_{ref} کمتر و $SOC1$ از SOC_{ref} کمتر باشد: در این وضعیت نیاز به تولید انرژی توسط موتور احتراق داخلی نسبت به سایر وضعیت‌ها بیشتر است، چرا که هم لازم است تا E خودرو به E_{ref} برسد و هم اینکه باتری شارژ شود تا وضعیت شارژ آن به SOC_{ref} نزدیک‌تر شود. البته در SOC های نزدیک به SOC_{ref} قابل قبول است که باتری شارژ نشود و حتی اندکی از بار را نیز متحمل شود. البته در این وضعیت برای خودروهای PHEV، لازم نیست که از توان موتور احتراق داخلی برای شارژ باتری استفاده شود و حتی در

قسمت‌هایی که خطر نزدیک شدن شارژ باتری به آستانه پایین وجود ندارد، باتری می‌تواند قسمتی از انرژی مورد نیاز برای رسیدن به E_{ref} را فراهم کند. البته برای خودروهای هیبریدی موازی می‌توان در نظر گرفت که توان باتری صفر باشد و یا به عبارتی باتری نه شارژ شود و نه توان تولید کند.

ب - E_1 از E_{ref} کمتر و SOC_1 از SOC_{ref} بیشتر است: پیشتر بیان شد که برای کاهش مصرف سوخت تا حد امکان از موتور احتراق داخلی توان گرفته نمی‌شود. بنابراین در این حالت که شارژ باتری در وضعیت مناسبی قرار دارد تماماً از توان تولیدی باتری استفاده می‌شود و تنها در صورتی که توان نهایی باتری نتواند اختلاف E_1 از E_{ref} را تامین کند، از موتور احتراق داخلی توان گرفته خواهد شد. بدین ترتیب در این پروژه اگر اختلاف E_1 از E_{ref} بیش از ۱۳۳۹۰ ژول باشد، موتور احتراق داخلی به کمک موتور الکتریکی می‌آید.

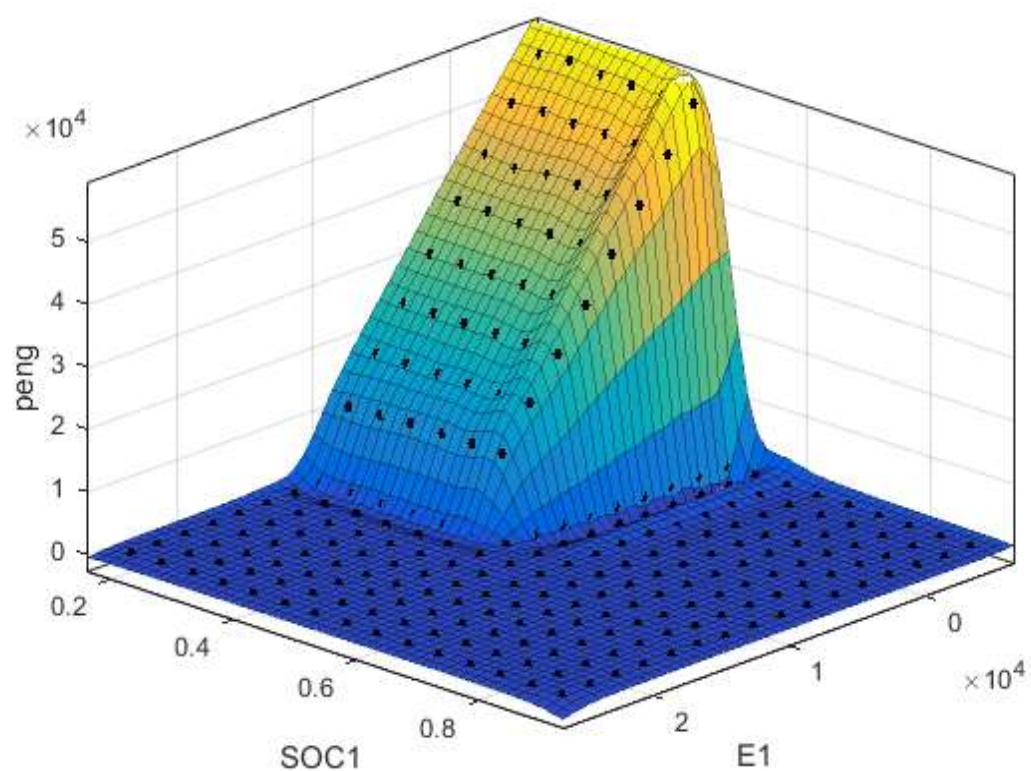
ج - E_1 از E_{ref} بیشتر است و SOC_1 از SOC_{ref} کمتر است: در این وضعیت توان تولیدی موتور احتراق داخلی کاملاً باید صفر باشد، زیرا نیازی به تولید توان نیست. در این حالت که SOC_1 از SOC_{ref} کمتر است، تا جایی که امکان دارد از توان ترمزی برای بازیابی انرژی^۱ و تولید توان منفی باتری استفاده می‌شود. به بیانی شفاف‌تر، اگر اختلاف E_1 از E_{ref} کمتر از ۱۳۳۹۰ ژول باشد تمام توان ترمزی بازیابی می‌شود. البته اگر SOC_1 به SOC_{ref} نزدیک باشد لزوماً احتیاجی نیست که تمام توان ترمزی بازیابی شود. در حالتی نیز که اختلاف E_1 از E_{ref} بیش از ۱۳۳۹۰ ژول باشد تا جایی که لازم باشد از توان ترمزی بازیابی شده و باقی‌مانده آن به صورت ترمز مکانیکی تلف می‌شود.

د - E_1 از E_{ref} بیشتر است و SOC_1 نیز از SOC_{ref} بیشتر است: به وضوح در این حالت هیچ توانی از موتور احتراق داخلی گرفته نمی‌شود و چون وضعیت شارژ باتری از وضعیت مطلوب بیشتر است، تمام اختلاف E_1 از E_{ref} به صورت ترمز مکانیکی تلف می‌شود. البته در صورت دور بودن وضعیت شارژ باتری از آستانه بالا، شارژ شدن باتری اتفاق بسیار ناخوشایندی نیست.

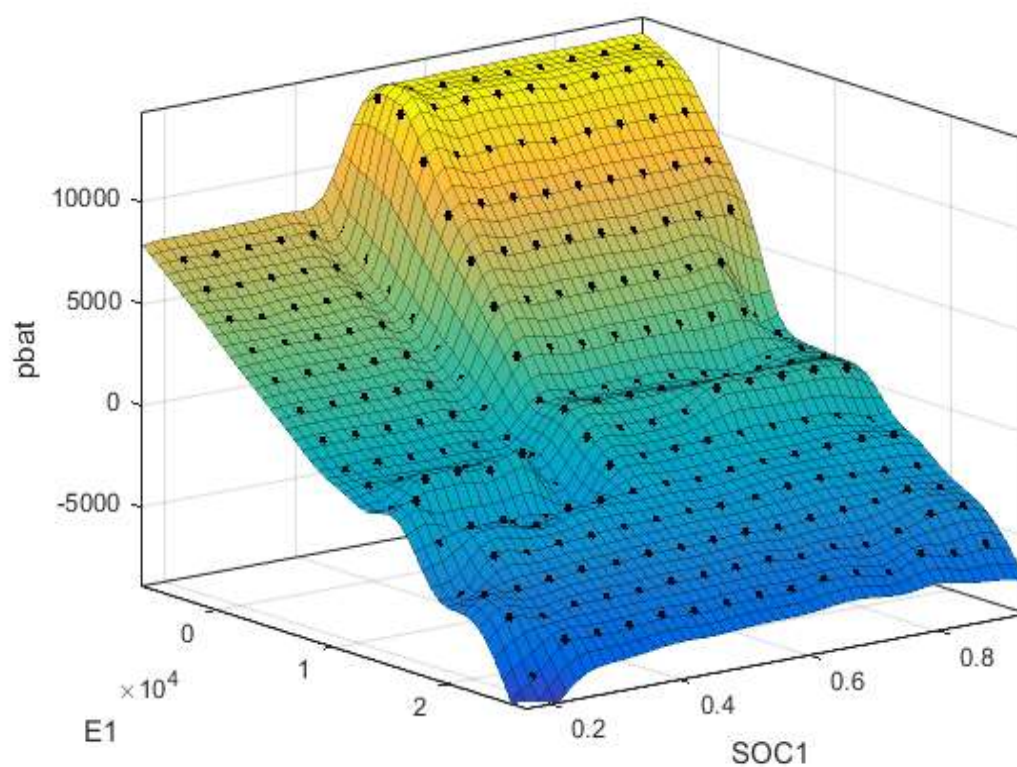
تفاوت اصلی طراحی کنترل به روش مذکور برای خودروهای پلاگین، هیبرید الکتریکی موازی و کمپلکس در وضعیت الف است و در سایر وضعیت‌ها تفاوت چندانی ندارد. با توجه به این شرایط، فرایند سعی و خطا برای بدست آوردن وزن‌هایی که این شرایط مطلوب را ارضا می‌کنند انجام می‌گیرد. پس از انجام یک سری سعی و خطا، این نتیجه بدست آمد که بهتر است مسئله برای ۴ ناحیه‌ی ذکر شده جدا حل شود و وزن‌ها برای هر ناحیه جداگانه تنظیم شوند. با بکارگیری این وزن‌ها نتایج مناسبی بدست آمد که به عنوان نمونه پاسخ‌های بدست آمده برای $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$ مطابق شکل (۳) هستند.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که همان‌گونه که مطلوب بود توان تولیدی در ناحیه‌ی ج و د صفر است. همچنین توان تولیدی در ناحیه‌ی الف بیشتر از ناحیه‌ی ب است که مطابق با خواست طراح است. در شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود که توان باتری در ناحیه‌ی ب بیشینه است. همچنین باتری در ناحیه‌ی ج تا حد ممکن شارژ می‌شود. در شکل (۵) نیز مشهود است که توان ترمزی تنها در نواحی ج و د که انرژی اولیه از انرژی مرجع بیشتر است مقدار غیر صفر گرفته است.

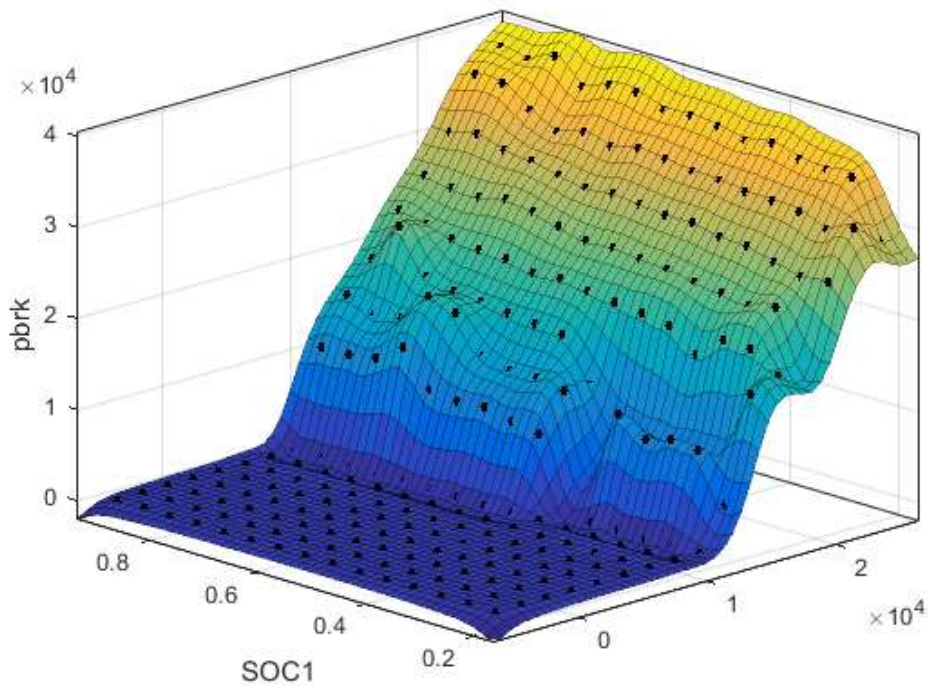
¹ Regenerative Brake



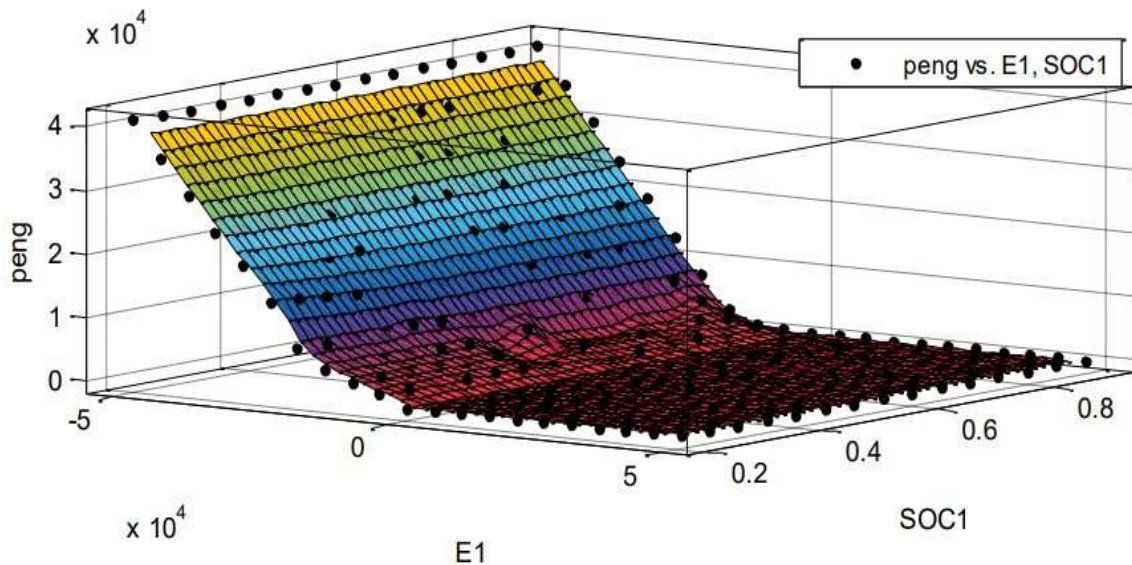
شکل ۳- P_{eng} برای هیبرید سری- موازی با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$



شکل ۴- P_{bat} برای هیبرید سری- موازی با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$

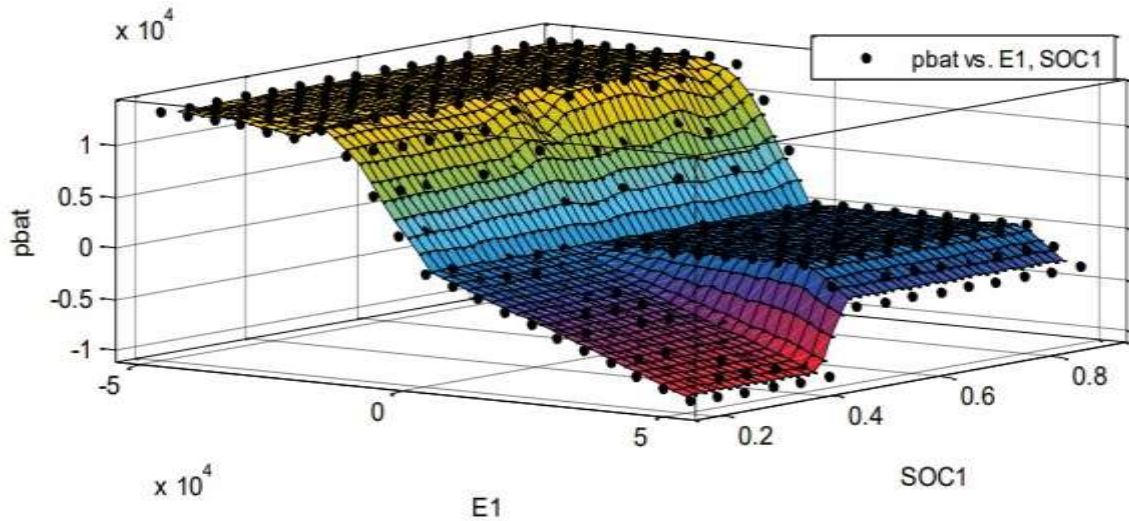


شکل ۵- P_{brk} برای هیبرید سری- موازی با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$

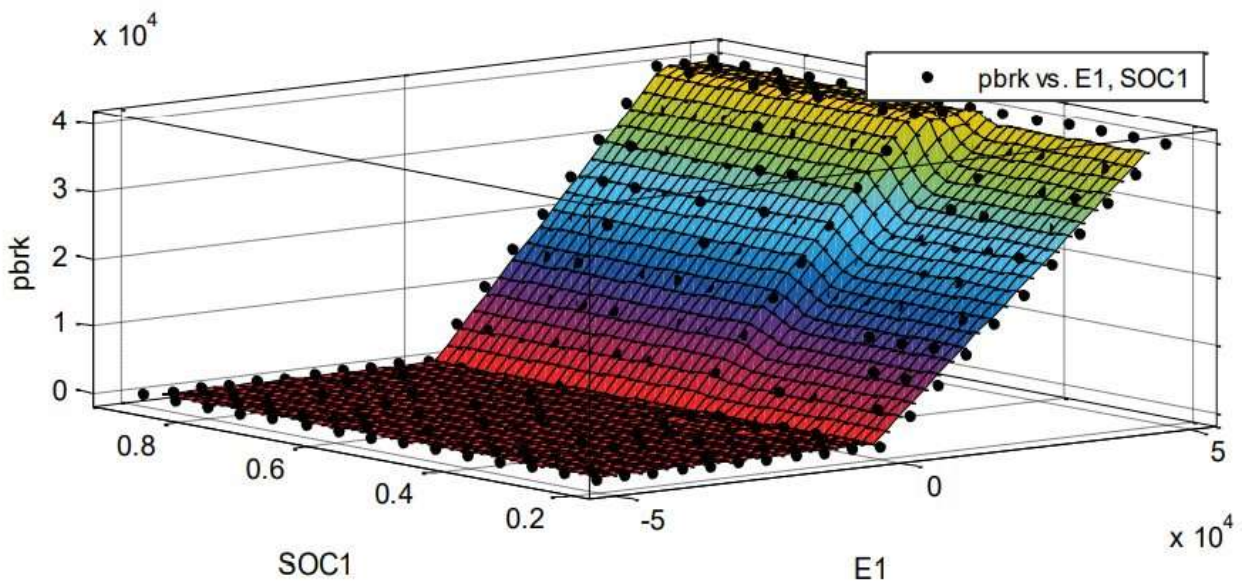


شکل ۶- P_{eng} برای PHEV با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$

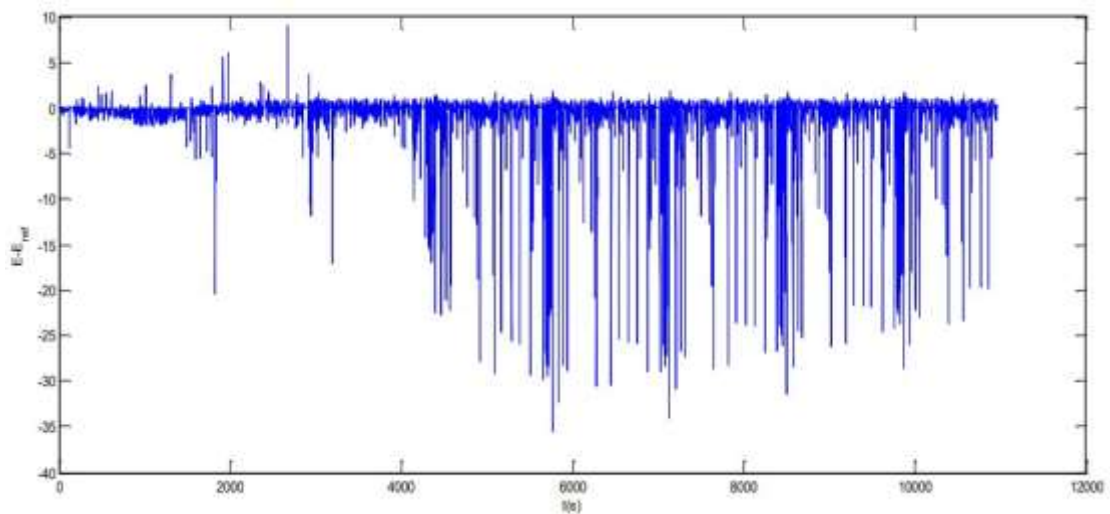
شکل های (۶) تا (۸) نیز ورودی های کنترلی را برای سیستم انتقال قدرت پلاگین نشان می دهند. بدیهی است برای سناریوهای ترمزی موتور احتراق داخلی نیازی به تامین توان ندارد که شکل (۶) هم موید این مطلب است. شکل (۷) نیز توان باتری را نشان می دهد که در زمان فعالیت موتور احتراق داخلی جهت کاهش مصرف سوخت فعال می شود و در هنگام ترمز نیز بسته به شرایط بخشی از توان ترمزی را به باتری باز می گرداند. در شکل (۸) نیز مشخص شده است که در هنگام حرکت خودرو توان ترمزی برابر صفر و در شرایط دیگر بسته به میزان کاهش سرعت خودرو مقدار آن متغیر است.



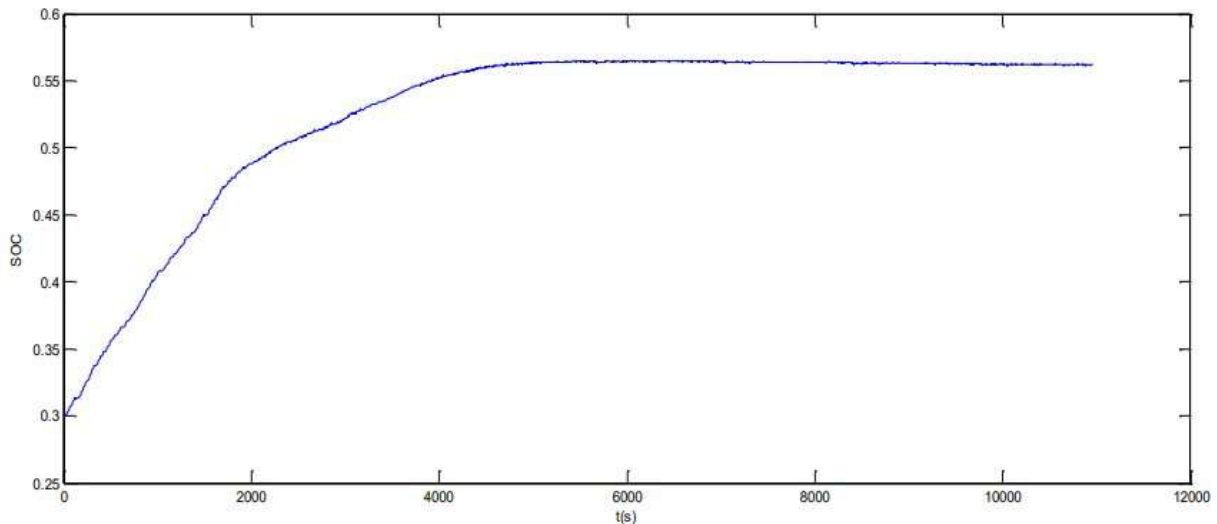
شکل ۷- P_{bat} برای PHEV با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$



شکل ۸- P_{brk} برای PHEV با $E_{ref} = 0$ و $SOC_{ref} = 0$



شکل ۹- اختلاف E از E_{ref}



شکل ۱۰- تغییرات SOC

برای شبیه‌سازی از مدل تهیه شده برای کنترلر استفاده می‌شود. استفاده از شکل های فوق نیز بدین ترتیب است که در هر لحظه انرژی مرجع از کاربر گرفته می‌شود. وضعیت شارژ باتری مرجع نیز مطابق ساختار خودرو مقدار مشخصی خواهد داشت. انرژی اولیه و وضعیت شارژ باتری اولیه از خروجی سیستم گرفته می‌شوند. با داشتن این اطلاعات و طی یک فرایند میان‌یابی دوخطی، ورودی‌های کنترلی از جداول مذکور بدست می‌آیند. از هشت سیکل UDDS به عنوان ورودی مرجع استفاده می‌شود و با استفاده از جداول ورودی‌های کنترلی محاسبه می‌شوند. در طی این هشت سیکل اختلاف انرژی تولیدی از انرژی مرجع مطابق شکل (۹) اختلاف E از E_{ref} بدست می‌آید. وضعیت انرژی مرجع $0/5$ در نظر گرفته شده و در لحظه صفر مقدار آن صفر است. تغییرات SOC نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. پس از طی مراحل فوق، برای مقایسه دقیق‌تر، مصرف سوخت برای تلاش‌های دوم، سوم و چهارم محاسبه شده‌اند که به ترتیب برابر با ۴۱۵، ۴۷۰ و ۳۹۰ سی‌سی برای یک سیکل رانندگی درون شهری ۱۲ کیلومتری هستند. مشاهده می‌شود که دو هدف کنترلی قابلیت رانندگی و رسیدن وضعیت شارژ باتری به وضعیت مطلوب به خوبی ارضا می‌شوند.

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

هدف این پژوهش طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک خودروی هیبرید الکتریکی است. با توجه به برتری‌هایی که راهکارهای بهینه نسبت به راهکارهای ابتکاری دارند تصمیم گرفته شد تا از کنترل پیش‌بین غیر خطی برای طراحی کنترلر استفاده شود. در همین راستا پس از آشنایی با تئوری کنترل پیش‌بین، مدلی متناسب با این روش کنترلی تهیه شد. سپس با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و ارائه قابلیت رانندگی مناسب به عنوان اهداف کنترلی تابع هزینه طراحی شد. با توجه به این تابع هزینه و قیدهای سراسری و محلی حاکم بر یک خودروی هیبرید الکتریکی سری-موازی کنترلی طراحی شد که به خوبی تمام اهداف کنترلی را ارضا می‌کند. با توجه به بلارنگ نبودن این کنترلر، کنترلر برای بازه وسیعی از ورودی‌های مرجع و شرایط اولیه طراحی شد و پاسخ‌های آن به صورت جدولی ذخیره شد تا برای استفاده بلادرنگ بتوان با میانمایی در میان جداول، ورودی‌های کنترلی مناسب را بدست آورد.

در آینده می‌توان با اعمال سیستم روی یک مدل پیچیده تر، بهینه سازی ضرایب کنترلی، تلاش های بیشتری در یافتن وزن ها، می‌توان دوهدف فوق را بهتر برآورده کرد. از آنجایی که روش کنترلی استفاده شده در این پژوهش مدل مبنا است، پیچیده کردن معادلات حالت، خصوصا باتری می‌تواند مشکل تر باشد ولی پاسخ‌های دقیق تری ارائه دهد. مدل سازی دقیق برای بخش شبیه سازی نتایج دقیق تری بدست خواهد داد که به حالت واقعی نزدیک تر خواهد بود.

مراجع

- [1] Birol, F., "Medium-term Energy Efficiency Market Report", IEA Publications, (2015).
- [2] International Energy Agency, "Energy and Air Pollution: World Energy Outlook Special Report", IEA Publications, (2016).
- [3] Sciarretta, A., and Guzzella, L., "Control of Hybrid Electric Vehicles," IEEE Control systems, Vol. 27, pp. 60-70, (2007).
- [4] Schouten, N.J., Salman, M.A., and Kheir, N.A., "Energy Management Strategies for Parallel Hybrid Vehicles using Fuzzy Logic", Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 171-177, (2003).
- [5] Won, J.S., and Langari, R., "Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle-Part II: Torque Distribution, Charge Sustenance Strategies, and Performance Results," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, pp. 935-953, (2005).
- [6] Lin, C.C, Kang, J.M., Grizzle, J. and Peng, H., "Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck", Proceedings of American Control Conference, June 25-27, Arlington, VA, pp. 2878-2883, (2001).
- [7] Bertsekas, D.P., "*Dynamic Programming and Optimal Control*", 1st Edition: Athena Scientific Belmont, MA, (1995).
- [8] Piccolo, A., Ippolito, L., Galdi, V., and Vaccaro, A., "Optimization of Energy Flow Management in Hybrid Electric Vehicles via Genetic Algorithms", Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 8-12, Como, Italy, pp. 434-439, (2001).
- [9] Kolmanovsky, I., Siverguina, I., and Lygoe, B., "Optimization of Powertrain Operating Policy for Feasibility Assessment and Calibration: Stochastic Dynamic Programming Approach", Proceedings of the American Control Conference, May 8-10, Anchorage, AK, pp. 1425-1430, (2002).
- [10] Moura, S.J., Fathy, H.K., Callaway, D.S. and Stein, J.L., "A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-in Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 19, pp. 545-555, (2011).

- [11] Onori, S., Serrao, L., and Rizzoni, G., "Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies", Springer, London, (2015).
- [12] Paganelli, G., Guerra, T., Delprat, S., Santin, J., Delhom, M., and Combes, E., "Simulation and Assessment of Power Control Strategies for a Parallel Hybrid Car", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 214, pp. 705-717, (2000).
- [13] Brahma, A., Guezennec, Y., and Rizzoni, G., "Optimal Energy Management in Series Hybrid Electric Vehicles", Proceedings of American Control Conference, June 28-30, Chicago, IL, pp. 60-64, (2000).
- [14] Sciarretta, A., Back, M., and Guzzella, L., "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 12, pp. 352-363, (2004).
- [15] Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y., and Staccia, B., "A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management", European Journal of Control, Vol. 11, pp. 509-524, (2005).
- [16] Fekri, F. and Assadian, F., "Fast Model Predictive Control and its Application to Energy Management of Hybrid Electric Vehicles", INTECH Open Access Publisher, (2011).
- [17] Sampathnarayanan, B., Serrao, L., Onori, S., Rizzoni, G., and Yurkovich, S., "Model Predictive Control as an Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles", ASME Dynamic Systems and Control Conference, October 12-14, Hollywood, CA, pp. 249-256, (2009).
- [18] Borhan, H.A., Vahidi, A., Phillips, A.M., Kuang, M.L., and Kolmanovsky, I.V., "Predictive Energy Management of a Power-split Hybrid Electric Vehicle", Proceedings of American Control Conference, June 10-12, St. Louis, MO, pp. 3970-3976, (2009).
- [19] Haber, R., Bars, R., and Schmitz, U., "Predictive Control in Process Engineering: From the Basics to the Applications", John Wiley & Sons, New York, (2012).

Abstract

Fuel consumption in the transportation has been rising in recent decades and consequently, it has increased pollution and environmental footprint. To address this worldwide problem, the aim of this study is to design a high-level controller with the capability to be implemented to a hybrid electric car in real time, while optimizing fuel consumption and drivability. To achieve this goal, nonlinear model predictive control is utilized based on the longitudinal dynamics of the powertrain. First, the controller is designed for a specific reference. In the next step, the controller is set for a wide range of reference inputs, through tuning the weighting parameters of the optimal control problem. It ultimately shows that all control targets are satisfied. Also applying the proposed energy management system to the powertrain model leads to considerable fuel consumption reduction. Meanwhile, the controller has the capability of being implemented in real time while considering the complex dynamics of the system.

Keyword: "Hybrid electric vehicles", "Energy management system", "Model predictive controller", "Fuel consumption"