استراتژی کنترل پیش‌بین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی

محمدتقی نوده[۱] حسین قلی زاده نرم[۲] و امین حاجی زاده[۳]

۱- کارشناس ارشد- دانشکده‌ی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود
M.t.nodeh@gmail.com
۲- دانشیار- دانشکده‌ی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود
gholizade@shahroodut.ac.ir
۳- دانشیار- دانشکده‌ی تکنولوژی انرژی، دانشگاه آلبورگ دانمارک
aha@et.aau.dk

چکیده: در این مقاله از روش کنترل بهینه‌ی هیبرید مبتنی بر مدل غیرخطی برای محاسبه‌ی تقسیم توان بهینه و مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی استفاده می‌شود. در استراتژی مدیریت توان برای توزیع بهینه‌ی توان بین موتور احتراق داخلی، سیستم الکتریکی و دیگر زیرسیستم‌ها از تئوری کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی استفاده می‌گردد. برای رسیدن به هدف از ساختار کنترل سلسله مراتبی استفاده می شود. این نوع ساختار کنترلی شامل سه سطح نظارتی، هماهنگ کننده و سطح محلی می‌باشد. مدل غیرخطی و شاخص عملکرد موجود در مسئله‌ی مطرح شده، در سطح نظارتی این کنترل کننده فرمول‌بندی می‌گردند. وجود دینامیک گسسته‌ی مد عملکردی(موتوری-ژنراتوری) در خودروی الکتریکی هیبرید ما را ملزم به استفاده از یک مدل سوئیچی دو حالته و بیان مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی جایگزین برای تعریف شاخص عملکرد می‌سازد. در شاخص عملکرد تعیین شده، جریمه‌ی خطای ردگیری، مصرف سوخت، تلفات اصطکاک و جمله نگهدارنده‌ی حالت شارژ باتری لحاظ گردیده‌اند. بهینه سازی شاخص عملکرد توسط تئوری کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی با استفاده از روش‌های عددی انجام می شود.

کلمات کلیدی: کنترل بهینه‌ی هیبرید، کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، خودروی الکتریکی هیبرید موازی، تقسیم توان

Keywords: Hybrid optimal control, nonlinear model predictive control, parallel hybrid electric vehicle, power distribution.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۹/۲۸
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین قلی‌زاده نرم
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – شاهرود – میدان هفت تیر– دانشگاه شاهرود – دانشکده‌ی برق و رباتیک

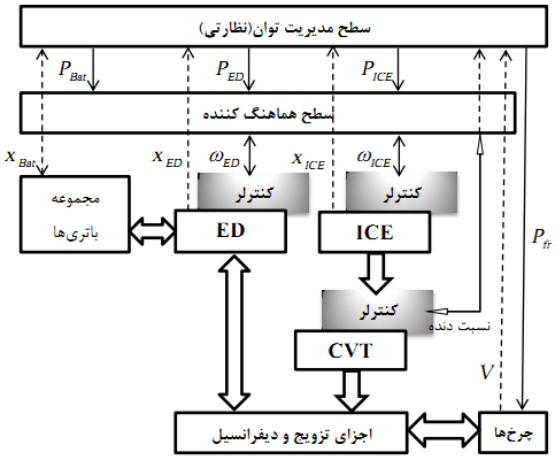
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

در سیستم رانشی خودروی الکتریکی هیبرید(HEV[1]) توان رانشی از دو یا بیش از دو منبع انرژی ترکیب شده و مطابق با خواسته‌های راننده، صرفه‌جویی سوخت و محدودیت‌های فیزیکی سیستم تامین می‌شود. معمولاً ساختار این خودروها از پیوند یک یا چند ماشین الکتریکی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و موتور احتراق داخلی(ICE[2]) تشکیل شده‌اند. از این‌رو استراتژی کنترل، یک الگوریتم مدیریت تقسیم توان ICE و ماشین‌های الکتریکی برای کاهش مصرف سوخت و کاهش آلایندگی می‌باشد. به‌طور کلی دو کلاس برای این الگوریتم‌ها تعریف می‌گردد. روش اول بکارگیری کنترل بهینه برای پیش‌بینی مشخصات رانندگی شناخته شده می‌باشد. در این روش، کنترل بهینه با مشتق‌گیری از قاعده‌ی مینیمم‌سازی توسط ابزارهای برنامه نویسی دینامیکی این قابلیت را فراهم می‌سازد. روش دوم طراحی الگوریتم‌های زمان واقعی[3] و کنترل برخط[4] خودرو می‌باشد[۱]. اکثر این روش‌ها مبتنی بر قوانین تجربی پیاده سازی می‌شوند. از معروفترین این روشها می‌توان به منطق فازی اشاره نمود[۲]. از مشکلات اساسی این روش تنظیم سخت و زمان‌بر، تعمیم غیرممکن برای سایر ساختار این خودروها و حساسیت شدید عملکرد به تنظیم دقیق آن‌ها می‌باشد. از این‌رو هدف بیشتر محققین روش دوم تنظیم دقیق پارامترها است[۳و۴]. در سال‌های اخیر، یک دسته‌بندی جدید از الگوریتم‌های زمان واقعی مبتنی بر استخراج کنترل بهینه در مطالعات پدید آمده است[۸-۵] که یکی از این روش‌ها استراتژی مینیمم‌سازی مصرف سوخت معادل می‌باشد[۱۳-۹].

روش پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر روش کنترل پیش بین مدل(MPC) در مورد HEV می‌باشد. مسئله‌ی اصلی در این روش پیش‌بینی شرایط رانندگی واقعی با استفاده از توزیع توان پیش بینی شده می‌باشد. آن‌چه ما را در طراحی این کنترل کننده کمک می‌نماید، استفاده از ساختار کنترل سلسله مراتبی می‌باشد.

ما در این مقاله روش کنترلی پیشنهادی را با قرار دادن در سطح نظارتی کنترل سلسله مراتبی تحقق خواهیم بخشید. شکل(۱) ساختار کنترل سلسله مراتبی برای یک خودروی الکتریکی هیبرید موازی(PHEV[5]) را نمایش می‌دهد. همان‌طوری در شکل (۱) پیداست، کنترل سلسله مراتبی از سه سطح کنترل نظارتی، هماهنگ کننده و کنترل محلی تشکیل شده است. ما در این مقاله مدل PHEV را از دید کنترل سطح نظارتی بیان نموده، تا بتوانیم در این سطح مسئله کنترل بهینه‌ی هیبرید(HOCP[6]) را توسط استراتژی کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی(NMPC[7]) اجرا نماییم. در شکل (۱) اجزای ICE ، درایو الکتریکی(ED[8]) و سیستم انتقال متغیر پیوسته(CVT[9]) دارای کنترل محلی بوده و توان خودرو از طریق اجزای تزویج و دیفرانسیل(CCD[10]) به چرخ‌ها(W[11]) منتقل می‌شود.



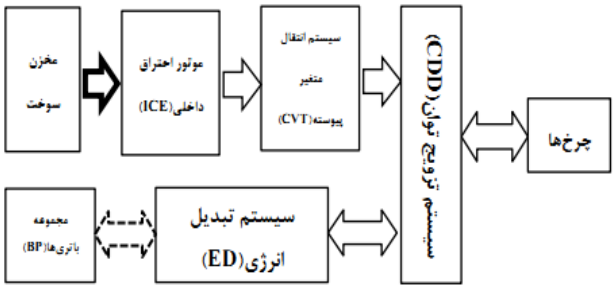
شکل(۱): ساختار کنترل سلسله مراتبی در PHEV

۲- مدل‌سازی خودرو هیبرید موازی

محاسبات سطح نظارتی بر اساس فرضیات سطح توان درخواستی قابل اجرا در سطح زیرسیستم‌ها انجام می‌شود. از آنجایی که عمل ردگیری توان درخواستی بر عهده‌ی کنترل‌کننده‌های سطح محلی می‌باشد، جداسازی کنترل سطوح نظارتی و محلی مسئله‌ساز می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت مدل‌سازی در سطح نظارتی باید رفتارهای حلقه بسته‌ی زیرسیستم‌ها را انعکاس دهد.

۲-۱- ساختار خودروی الکتریکی هیبرید موازی

ساختار خودروی هیبرید موازی به صورت شکل (۲) می‌باشد. در این ساختار منبع اصلی تامین توان، ICE بوده که از طریق CVT در CDD با ED تزویج شده است.



شکل(۲): ساختار خودروی الکتریکی هیبرید موازی(PHEV). خط پررنگ مسیرشیمیایی، خط کمرنگ مسیر مکانیکی و خط-فاصله مسیر الکتریکی

۲-۲- مدهای عملکردی

با توجه به رفتارهای ضروری PHEV می‌توان پنج مد عملکردی متفاوت بیان نمود[۱۴]. مدل‌سازی خودرو برای پنج مد عملکردی متفاوت پیچیده می‌باشد. از این‌رو با کمی دقت در دینامیک سیستم و با توجه به شرایط کاری سیستم الکتریکی می‌توان دو مد کلی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]

موتوری/ژنراتوری را برای PHEV در نظر گرفت. حال می‌توان این دو مد را این‌گونه از هم جدا نمود:

الف- مد موتوری($v=0$): زمانی است که توان ED ($P_{ED} \geq 0$) غیرمنفی است. در این حالت سه مد عملکردی مختلف روی خواهد داد. مد موتور احتراقی تنها ($P_{ICE} > 0, P_{ED} = 0$)، مد موتور الکتریکی تنها ($P_{ICE} = 0, P_{ED} > 0$) و مد هیبرید ($P_{ICE} > 0, P_{ED} > 0$) سه مد عمکردی متفاوت می‌باشند.

ب- مد ژنراتوری($v=1$): زمانی است که توان ED ($P_{ED} < 0$) منفی می‌باشد. در این حالت نیز دو مد عملکردی دیگر اتفاق می‌افتد. این دو مد، شارژ باتری ($P_{ICE} > 0, P_{ED} < 0$) و مد بازگشت انرژی ترمزگیری ($P_{load} < 0, P_{ED} < 0$) می‌باشند.

۲-۳- مدل‌سازی PHEV

از آن‌جایی‌که در معادلات مسیر توان، ED دارای دینامیک سریع‌تر نسبت به زیرسیستم‌های مکانیکی می‌باشد، بازده ورودی و خروجی به معادلات جبری مدل شده در سطح نظارتی وابسته است. در این تحقیق مدل مسیر توان نظارتی HEV با سه متغیر حالت توان موتوراحتراقی($P_{ICE}(t)$)، حالت شارژ باتری(SOC[۱۲]) نرمالیزه($\overline{W}_{bat}(t)$) و سرعت خودرو($V(t)$) بیان شده است. برای نشان دادن مزایای استفاده از این نوع مدل‌سازی، می‌توان دینامیک‌های HEV را به صورت رابطه (۱) خلاصه نمود[۱۵و۱۶].

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{ICE} \\ \dot{\overline{W}}_{bat} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = f_{v(t)}\left([P_{ICE}, \overline{W}_{bat}(t), V(t)], u_{v(t)}(t)\right) \qquad (۱)$$

که در آن $f_v(...)$ معادلات مد موتوری با v=0 و مد ژنراتوری با v=1 را نمایش می‌دهد. قانون کنترل اعمالی در هر دو مد با رابطه(۲) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} u_{0/1}(t) = [&eng(\omega_{ICE}(V, P_{ICE}))u_{ICE}(t) \\ &, u_{fr}(t), u_{EM/GEN}(t)] \\ &\in [0,1]\times[0,1]\times[0,1] \end{aligned} \qquad (۲)$$

در این رابطه $u_{ICE}(t)$ ورودی کنترلی اعمالی به ICE برای تعیین سرعت آن نسبت به سرعت ماکزیمم، $eng(\omega_{ICE}(V, P_{ICE}))$ فرمان روشن و خاموش شدن ICE، $u_{fr}(t)$ کنترل اعمالی به برای ترمز اصطکاکی و $u_{EM/GEN}(t)$ ورودی کنترلی ED بوده و بسته به مد عملکردی، موتوری یا ژنراتوری می‌شود. ω_{ICE} نیز سرعت ICE می‌باشد.

هدف ما در این بخش تعیین معادلات و محدودیت‌های مرتبط با مدل HEV توسعه یافته و نحوه‌ی عملکرد آن می‌باشد. از این‌رو ابتدا معادله‌ی دینامیکی ICE را در هر دو مد توصیف می‌کنیم. سپس معادلات SOC و سرعت خودرو را وابسته به مد کاری مشروط خواهیم نمود.

۲-۴- دینامیک ICE

معادله‌ی توان تولیدی لحظه‌ای ($P_{ICE}(t)$) با توجه مسائل آیرودینامیک و تلفات ناشی از پمپ‌های موتور احتراقی، اصطکاک و دریچه‌ی هوا به صورت زیر به دست می‌آید. در این مدل‌سازی فرض براین است که ICE نیرو را به صورت یک‌طرفه به سیستم انتقال می‌دهد.

$$\begin{aligned} \dot{P}_{ICE}(t) = &-\frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}(t) \\ &+ \frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}^{\max}(\omega_{ICE}).u_{ICE}(t).eng(\omega_{ICE}) \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن τ_{ICE} ثابت زمانی نامی توان تحویلی ICE می‌باشد. $P_{ICE}^{\max}$ نیز حداکثر توان تولیدی ICE است که وابسته به ω_{ICE} می‌باشد. ω_{ICE} سرعت ICE است و توسط کنترل‌کننده‌ی CVT در سیستم‌های هیبرید تغییر می‌کند[۱۷]. $u_{ICE}(t).eng(\omega_{ICE})$ نیز کنترل اعمالی بر روی ICE بوده و ترکیبی از وضعیت روشن و خاموش بودن ICE و قانون کنترلی اعمالی ICE می‌باشد.

$$\begin{aligned} \omega_{ICE}(V, P_{ICE}) = &(1-p)\omega_{ICE}^{\min}(V) \\ &+ p\,\omega_{ICE}^{\max}(V) \end{aligned} \qquad (۴)$$

که در آن $p = \dfrac{P_{ICE}}{P_{ICE}^{\max}(\omega_{ICE}^{\max}(V))}$.

۲-۵- مدل باتری

برای مدل‌سازی باتری ویافتن معادلات انرژی نرمالیزه شده و SOC از مراجع[۱۸و۱۹] استفاده شده است. معادله حالت دینامیک SOC براساس نگهداری توان و انرژی باتری توصیف شده است. معادله(۵) مدل باتری را بسته به مد عملکردی و توان نامی باتری بیان می کند.

$$\begin{aligned} \dot{\overline{W}}_{bat} = &\frac{d_{3,v}}{W_{bat}^{\max}}\left(P_{bat,nom}^{v}\right)^2 \\ &-\{\ln(d_{1,v}\overline{W}_{bat} + d_{2,v}) \\ &+2d_{3,v}P_{bat,nom}^{v} + d_{4,v}\}\frac{P_{bat}(t)}{W_{bat}^{\max}} \end{aligned} \qquad (۵)$$

که در آن $W_{bat}^{\max}$ ماکزیمم انرژی نامی، $P_{bat,nom}$ توان نامی و $P_{bat}(t)$ توان لحظه‌ای باتری می باشد. توان لحظه ای در مد موتوری(v=0) مثبت و به ED توان تحویل داده و در مد ژنراتوی(v=1) منفی و از آن توان دریافت می‌نماید. $\{d_{1,v}, d_{2,v}, d_{3,v}, d_{4,v}\}$ نیز مجموعه پارامترهای باتری بوده که

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

بسته به مد کاری و مدل خاص باتری تغییر می‌کنند. توان لحظه‌ای توسط ورودی کنترلی $u_{EM/GEN}(t)$ کنترل می‌شود.

$$P_{bat}(t)=\begin{cases} P^{0}_{ED,in} & v=0 \\ -P^{1}_{ED,out} & v=1 \end{cases} \quad (۶)$$

۶-۲- مدل خودرو

معادله‌ی سرعت خودروهای متداول بر اساس عملکرد مسیر توان با رابطه(۷) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -\{\frac{k_{v1}}{m_c}V^2 + k_{v2}\cos(\alpha(t))\}\mathrm{sgn}(V) \\ &\quad - g\sin(\alpha(t)) + \frac{1000}{m_c(V+\varepsilon v)}(P^{v}_{CDD,wh} - P_{fr})\end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن εv ضریب تنظیم، m_c وزن خودرو، $\frac{k_{v1}}{m_c}V^2$ کشش آیرودینامیک[۱۳] نرمالیزه، $k_{v2}\cos(\alpha(t))$ مقاومت چرخش[۱۴]، $\alpha(t)$ زاویه‌ی شیب جاده، $P^{v}_{CDD,wh}$ توان دریافتی یا تحویلی(با توجه به مد کاری) به CDD و در نهایت P_{fr} توان ترمز اصطکاکی بوده و از رابطه‌ی(۸) بدست می‌آید.

$$P_{fr} = P^{\max}_{fr}(V)u_{fr}(t) \quad (۸)$$

که u_{fr} تلاش کنترلی نرمالیزه شده ترمزی می باشد. سرعت خودرو نیز درون مجموعه‌ی $V\in[V^{\min},V^{\max}]\subset R$ قرار می‌گیرد.

۷-۲- مدل ED

معادلات جبری مسیر توان ورودی و خروجی ED در هر دو مد کاری از مرجع[۲۰] استخراج شده است. این رابطه‌ی جبری را می‌توان توسط معادله(۹) بیان نمود.

$$P^{v}_{ED} = \eta^{v}_{ED}(\omega_{ED})P^{v}_{ED,in} \quad (۹)$$

تمامی ترم‌های معادله(۹) وابسته به مدکاری و جهت مسیر توان در سیستم می‌باشند. P^{v}_{ED} توان خروجی ED، $\eta^{v}_{ED}(\omega_{ED})$ بازده ED بوده و شدیداً به کنترل حلقه بسته وابسته است. سرعت رتور درایو الکتریکی $\omega_{ED}=\beta V$ که V سرعت خودرو و β یک ضریب ثابت مثبت می‌باشد.

توان ورودی ED در مد موتوری و ژنراتوری با رابطه(۱۰) توصیف می‌شود.

$$\begin{aligned}P^{0}_{ED,in}(\omega_{ED}) &= P^{\max}_{ED,in}\left(\omega_{ED}(V)\right)u_{EM}(t) \\ P^{1}_{ED,in}(\omega_{ED}) &= P^{\max}_{ED,in}\left(\omega_{ED}(V)\right)u_{GEN}(t)\end{aligned} \quad (۱۰)$$

که در آن $P^{\max}_{ED,in}\left(\omega_{ED}(V)\right)$ حداکثر توان ورودی ED و با کنترل‌های $u_{EM}(t)$ در مد موتوری و $u_{GEN}(t)$ در مد ژنراتوری مدوله شده‌است. بالانشان صفر و یک نیز به ترتیب نشانه مد موتوری و ژنراتوری است.

۸-۲- معادلات مسیر توان CVT و CDD

رابطه‌ی جبری بین توان‌های ورودی و خروجی درسطح نظارتی به صورت معادله(۱۱) بیان می‌شود.

$$P_{cvt,out} = \eta_{cvt}.P_{cvt,in} \quad (۱۱)$$

که در آن η_{cvt} بازده، $P_{cvt,in}=P_{ICE}$ توان ورودی CVT و $P_{cvt,in}=P_{CDD,cvt}$ توان خروجی تحویلی به CDD می‌باشند.

توان ورودی و خروجی در CDD مطابق رابطه(۱۲) می‌باشد.

$$\begin{aligned}P^{0}_{CDD,wh}(t) &= \eta_{cdd1}P^{0}_{CDD,cvt} + \eta_{cdd2}P^{0}_{CDD,ED} \\ P^{1}_{CDD,ED}(t) &= \eta_{cdd2}P^{1}_{CDD,cvt} - \eta_{cdd2}P^{1}_{CDD,wh}\end{aligned} \quad (۱۲)$$

که در آن η_{cdd1} و η_{cdd2} بازده انتقال توان بین CVT، ED و چرخ‌ها می‌باشند. توان‌های موجود در رابطه (۱۲) نمایانگر جهت جریان توان در مد موتوری (صفر) و ژنراتوری (یک) می‌باشند.

۳- شاخص عملکرد

برای ترکیب رفتار مطلوب در عملکرد HEV از یک تابع هدف محدب به شکل رابطه(۱۳) استفاده می‌نماییم.

$$\begin{aligned}J_v\left(x_0,u,[t_0,t_f]\right) &= g(t_0,x_0,t_f,x_f) \\ &\quad + \int_{t_0}^{t_f} L_v(t,x,u)dt\end{aligned} \quad (۱۳)$$

که در آن $L_v(t,x,u)$ تابع وابسته به مد در تابع هدف بوده و ممکن است فقط از مصرف سوخت[۲۱] یا ترکیبی از مصرف سوخت و انتشار آلایندگی باشد[۲۲و۲۳]. هدف ما، انتخاب شاخص عملکردی است که تابع شرایط مسئله‌ی مدیریت مسیر توان بوده، به‌طوری که یک تفسیر فیزیکی از مصرف سوخت داشته باشد. برای یک مصالحه‌ی خوب، در تابع هزینه‌ای که تعریف نموده‌ایم، باید در تعریف L_v جریمه‌ی ردگیری سرعت و توان‌های مصرفی و تلفاتی زیرسیستم-ها در هر دو مد کاری لحاظ گردد. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned}L_v &= C^{v}_{V}\left(V(t)-V^{des}(t)\right)^2 \\ &\quad + C^{v}_{ICE}\left(P_{fuel}\right)^2 + C^{v}_{cvt}\left(P_{cvt,loss}\right)^2 \\ &\quad + C^{v}_{CDD}\left(P^{v}_{C,loss}\right)^2 + C^{v}_{ED}\left(P^{v}_{ED,loss}\right)^2 \\ &\quad + C^{v}_{bat}\left(P^{v}_{bat,loss}\right)^2 + C^{v}_{fr}\left(P_{fr}\right)^2\end{aligned} \quad (۱۴)$$

در معادله(۱۴) توصیف فیزیکی در هر دو حالت L_v به ازای $v=\{0,1\}$ به شرح زیر است:

- در ترم $C^{v}_{V}\left(V(t)-V^{des}(t)\right)^2$ پارامتر $V(t)$ سرعت خودرو و $V^{des}(t)$ مشخصات سرعت درخواستی بوده و در مجموع توصیف کننده‌ی انحراف خطای ردگیری می‌باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]

• در ترم $C_{ICE}^{v}\left(P_{fuel}\right)^{2}$ پارامتر P_{fuel} توان مصرفی در ICE بوده و در مجموع جریمه‌ی مصرف سوخت را نشان می‌دهد.

• در عبارت $C_{cvt}^{v}\left(P_{cvt,loss}\right)^{2}$ پارامتر $P_{cvt,loss}$ توان تلفاتی CVT بوده و جریمه‌ی تلفات CVT را توصیف می‌کند.

• ترم $C_{CDD}^{v}\left(P_{C,loss}^{v}\right)^{2}$ توسط توان تلفاتی CDD و ($P_{C,loss}^{v}$) جریمه‌ی تلفات در CDD را لحاظ می‌کند.

• در جمله $C_{ED}^{v}\left(P_{ED,loss}^{v}\right)^{2}$ عبارت $P_{ED,loss}^{v}$ توان تلفاتی ED بوده و جریمه‌ی تلفات ED را نشان می‌دهد.

• عبارت $C_{bat}^{v}\left(P_{bat,loss}^{v}\right)^{2}$ با توجه به $P_{bat,loss}^{v}$ که ناشی از تلفات شارژ و دشارژ باتری می‌باشد، توصیف کننده‌ی جریمه‌ی تلفات BP می‌باشد.

• در ترم $C_{fr}^{v}\left(P_{fr}\right)^{2}$ پارامتر P_{fr} تلفات ناشی از ترمزگیری اصطکاکی بوده و جریمه‌ی تلفات ترمز اصطکاکی را بیان می‌کند.

• تمامی ضرایب استفاده شده در معادله(۱۴) غیر منفی بوده و نشان دهنده اهمیت هر یک از جملات در تابع جریمه می‌باشد ($C_{V}^{v},\ldots,C_{fr}^{v}\geq 0$).

همان‌طوری که می‌دانیم متغیر کنترلی گسسته(مد عملکردی خودرو) فقط مقادیر صفر و یک را اختیار می کند. با جایگذاری این دینامیک گسسته در شاخص عملکرد رابطه‌ی نهایی به فرم زیر درمی‌آید. هدف مسئله‌ی مینیمم‌سازی، پیدا کردن مقادیر u_0^* ، u_1^* و v^* به عنوان جواب‌های بهینه می‌باشد.

$$\min_{u_0,u_1\in\Omega,v\in[0,1]} J\left(x_0,t\right)=\min_{u_0,u_1\in\Omega,v\in[0,1]}\left\{C_{bat,final}\left(\overline{W}_{bat}\left(t_f\right)-0.6\right)^{2}+\int_{t_0}^{t_f}L_E\left(t,x,u_0,u_1,v\right)dt\right\} \quad (۱۵)$$

که در آن:

$$L_E\left(t,x,u_0,u_1,v\right)=\left(1-v\left(t\right)\right)L_0\left(t,x,u_0\right)+v\left(t\right)L_1\left(t,x,u_1\right) \quad (۱۶)$$

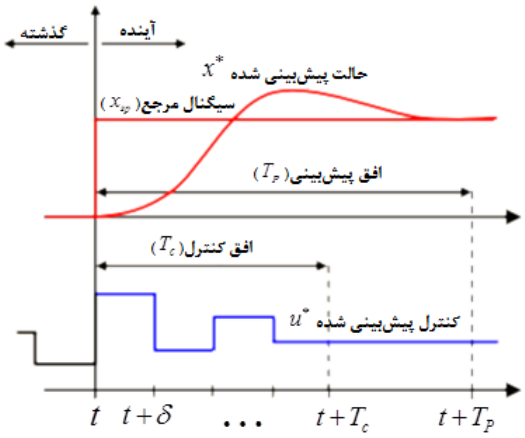
در نهایت، مجموعه معادلات دینامیکی مسیر توان سطح نظارتی HEV به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}\dot{x}&=f_E\left(t,x,u_0,u_1,v\right)\\&=\left(1-v\left(t\right)\right)f_0\left(x\left(t\right),u_0\left(t\right)\right)\\&+v\left(t\right)f_1\left(x\left(t\right),u_1\left(t\right)\right)\end{aligned} \quad (۱۷)$$

در رابطه (۱۷)، f_0 و f_1 به ترتیب معادلات حالت دینامیکی در مد موتوری و ژنراتوری می باشند.

۴- کنترل پیش بین مدل غیرخطی(NMPC)

به‌طور کلی حل مسئله‌ی NMPC همانند حل یک مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه باز با افق محدود برخط که تابع دینامیک‌های سیستم و محدودیت‌های حالت‌ها و کنترل‌ها می‌باشد، فرموله می‌شود. شکل (۳) قاعده کلی پایه‌ای MPC را نشان می‌دهد[۲۴].



شکل(۳): قاعده‌ی کلی مدل کنترل پیش‌بین

براساس اندازه‌گیری‌های بدست آمده در t، کنترل‌کننده رفتار دینامیکی سیستم را در طول افق پیش‌بینی T_P پیش‌بینی کرده و ورودی را برای تابع هدف بهینه شده‌ی حلقه باز تعیین می‌نماید. اگر اغتشاش و عدم قطعیت در مدل فرایند نباشد و مسئله‌ی بهینه‌سازی برای افق نامحدود قابل حل باشد، آنگاه اعمال تابع ورودی سیستم که در $t=0$ بدست آمده برای همه‌ی زمان‌های $t\geq 0$ امکان‌پذیر می‌باشد. به دلیل این‌که اغتشاشات و عدم قطعیت مدل فرآیند بین رفتار سیستم و رفتار پیش‌بینی شده باعث اختلاف می شود، این امکان برای عموم سیستم‌ها وجود ندارد[۲۵].

به منظور ترکیب برخی از مکانیزم‌های فیدبکی، تابع ورودی حلقه باز تنها زمانی اجرا خواهد شد که لحظه‌ی ابتدایی اندازه‌گیری بعدی در دسترس باشد. اختلاف زمانی بین تجدید محاسبات و اندازه‌گیری می‌تواند متفاوت باشد، ولی اغلب این اختلاف را ثابت فرض می‌کنند، یعنی اندازه‌گیری در هر واحد از زمان نمونه‌گیری δ انجام می‌شود. با استفاده از اندازه‌گیری جدید در زمان $t+\delta$ ، کل روش(پیش‌بینی و بهینه‌سازی) برای یافتن تابع ورودی جدید همراه با کنترل و افق پیش‌بینی رو به جلو تکرار می‌شود.

۵- اعمال روش NMPC برای کنترل PHEV

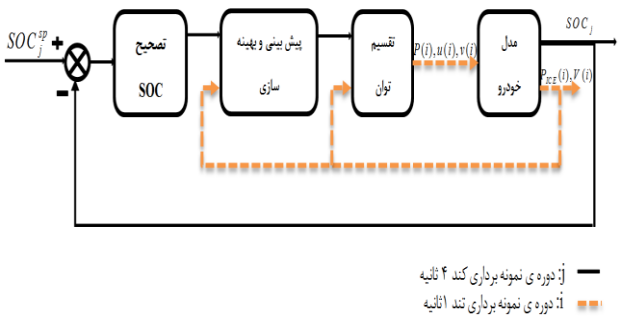
ما در این بخش به ارائه‌ی جزئیات شاخص عملکرد PHEV برای بهینه‌سازی توسط NMPC می‌پردازیم. در این بررسی، دوره‌ی نمونه‌برداری برای محاسبه‌ی NMPC یک ثانیه در نظر گرفته خواهد شد. در شبیه‌سازی‌ها فرض بر این است که NMPC هیچ دانشی در مورد آینده‌ی شیب جاده نداشته و تنها آگاهی آن، تخمین و درونیابی شیب

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

جاده در طول افق پیش‌بینی می‌باشد. در نهایت حالت‌های واقعی در انتهای افق کنترل با شناخت شیب جاده از روی مدل شبیه‌سازی شده‌ی دقیق محاسبه خواهند شد.

آن‌چه که استراتژی NMPC را پیچیده می‌نماید، محدودیت نگهداری شارژ باتری می‌باشد. اعمال این محدودیت بر روی تابع هزینه منجر به پدید آمدن فیدبک حالت در NMPC شده و سطح نامی حالت شارژ باتری به عنوان یک نقطه‌ی تنظیم[۱۵] در شاخص عملکرد و استراتژی کنترل می‌گردد. در شکل(۴) فرآیند اعمال NMPC بر روی خودروی الکتریکی هیبرید را نشان می‌دهد[۲۶].



شکل(۴): بلوک دیاگرام NMPC بر روی PHEV

آن‌چه که در شکل(۴) به روشنی قابل رویت است وجود دو دوره‌ی نمونه برداری تند و کند می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، متغیرهای توان موتور احتراقی($P_{ICE}(t)$) و سرعت خودرو($V(t)$) در هر لحظه‌ی نمونه برداری به‌روزرسانی شده در حالی که سطح شارژ باتری(SOC) در انتهای افق کنترل(یعنی بعد از ۴ ثانیه) به‌روزرسانی می‌شود، که این امر به دلیل دینامیک کند باتری و سرعت انحراف SOC از سطح نامی کم بوده و می‌توان SOC را به صورت فیدبک حالت مدل‌سازی نمود. با توجه به مطالب گفته شده ضریب جریمه‌ی انحراف سطح SOC در ترم لحاظ شده‌ی شاخص عملکرد با مشکل روبه‌رو خواهد شد. برای غلبه بر این مشکل، با فرض مشخص بودن زمان نهایی، ضریب جریمه‌ی انحراف SOC را با استفاده از درونیابی خطی محاسبه نموده و به صورت تابعی خطی از زمان نهایی به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

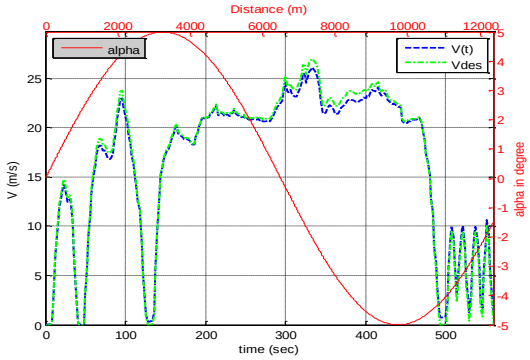
$$C_{Wbat,j} = \left(\frac{t_{f,j}}{t_f}\right) C_{Wbat,N} \qquad (۱۸)$$

که در آن t_f زمان پایانی، $t_{f,j} \in [4,\ldots,t_f]$ زمان پایانی در هر افق کنترل NMPC و $C_{Wbat,N}$ ضریب جریمه‌ی انحراف SOC از سطح نامی ۰/۶ در زمان نهایی می‌باشند[۲۷ و ۲۸].

۶- نتایج شبیه سازی

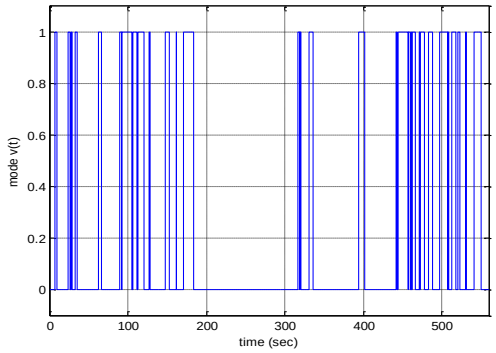
مشخصات رانندگی استفاده شده بر روی مدل شبیه‌سازی شده‌ی خودرو، سیکل استاندارد آمریکایی US06 در شرایط جاده با شیب سینوسی پنج درجه‌ای در شکل(۵) نمایش داده شده است. در این شکل عمل ردگیری سرعت به خوبی به نمایش گذاشته شده و کنترل کننده به‌طور مطلوب و با خطای بسیار کم، سرعت درخواستی را فراهم نموده است.

در شکل(۵) محورهای پایین و چپ به ترتیب محور زمان بر حسب ثانیه(s) و محور سرعت خودرو بر حسب متر بر ثانیه(m/s) بوده، در حالی محورهای بالا و راست به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مسافت طی شده بر حسب متر(m) و مقدار شیب جاده بر حسب درجه(d) می‌باشند. در این شکل منحنی خط-فاصله سرعت لحظه‌ی خودرو، منحنی خط-فاصله-نقطه سرعت درخواستی و منحنی خط-ممتد شیب جاده است.



شکل(۵): سیکل استاندارد آمریکایی US06 در شرایط جاده با شیب سینوسی پنج درجه

شکل(۶) مد عملکردی خودرو در طول چرخه‌ی رانندگی را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در معادلات مربوط به مدل‌سازی بیان شد، مد عملکردی داری دو حالت صفر(مد موتوری) و یک(مد ژنراتوری) می‌باشد.



شکل(۶): مد عملکردی خودرو

مقادیر ضرایب جریمه‌ی استفاده شده در تابع هزینه در جدول (۱) آمده است [۱۵].

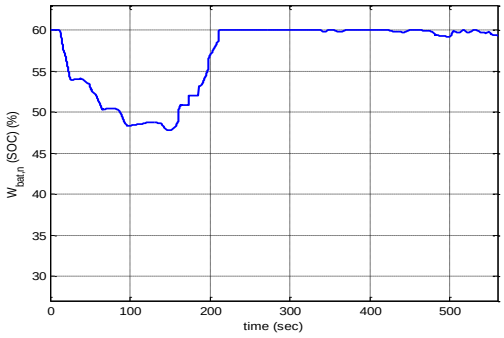
جدول(۱): مقادیر ضرایب تابع هزینه

ضرایب	C_v	C_{ICE}	C_{fr}	$C_{Wbat,N}$	$C_{ED},\ldots,C_{bat}$
مقادیر	10	10^{-3}	10^{-4}	10^{5}	0

شکل(۷) درصد شارژ باتری(SOC) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل پیداست، با توجه به استراتژی کنترلی به‌کار رفته در ابتدای چرخه‌ی رانندگی برای تامین نیروی رانشی، شارژ باتری صرف تولید گشتاور در ED شده است. بنابراین مقدار آن تقریباً تا ۵۰ درصد

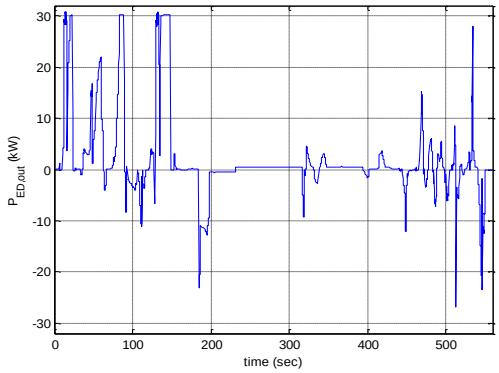
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

کاهش یافته و سپس با توجه به شرایط رانندگی توسط ED شارژ می-گردد.



شکل(۷): انرژی نرمالیزه شده‌ی باتری(SOC)

شکل(۸) توان ورودی/خروجی راه‌انداز الکتریکی(ED) را نشان می‌دهد. توان‌های مثبت نشان‌دهنده‌ی تولید توان مکانیکی خروجی در مد موتوری بوده و توان مکانیکی ورودی به ED در مد ژنراتوری با علامت منفی رسم شده است.

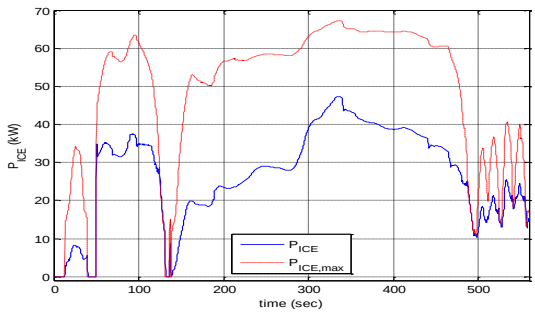


شکل(۸): توان ورودی/خروجی ED

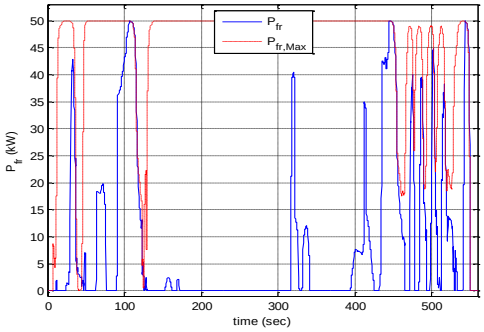
در شکل(۹) منحنی تغییرات توان موتور احتراقی(ICE) نشان داده شده است. منحنی توان نشان می‌دهد که در ابتدای چرخه‌ی رانندگی ICE هیچ نقشی در تامین توان نداشته و ED به تنهایی توانایی فراهم نموده توان لازم را داشته است. بعد از تقریبا ۲۰ ثانیه موتور احتراقی به دلیل عدم توانایی تولید توان لازم توسط ED و کاهش SOC روشن شده و در محدوده‌ی مجاز شروع به تولید توان نموده است.

شکل(۱۰) نمودار توان تلف شده حاصل از ترمز اصطکاکی را نشان می-دهد. این توان در صورت نیاز به ترمز اصطکاکی برای کاهش سرعت خودرو استفاده می‌گردد.

شاخص عملکرد به‌دست آمده با توجه به چرخه‌ی رانندگی مورد نظر برابر $۲/۱۶۹۶ \times ۱۰^{۵}$ و صرفه‌جویی سوخت ۲۰/۵۴ می‌باشد. پر واضح است که مقدار شاخص عملکرد و صرفه‌جویی سوخت به ضرایب جریمه وابسته است. برخی از مقالات مقدار صرفه جویی بیشتری به دست آورده اند ولی دلیل اصلی آن استفاده از مدل های دیگر برای این مسیر است [۲۹].



شکل(۹): توان خروجی ICE



شکل(۱۰): توان ترمز اصطکاکی

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از تئوری کنترل بهینه‌ی هیبرید برای حل مسئله‌ی کنترل و مدیریت توان در خودروهای الکتریکی هیبرید موازی استفاده شد. با بیان مسئله به صورت کنترل بهینه‌ی جایگزین، عمل ادغام دو شاخص عملکرد مد موتوری و ژنراتوری را انجام شد. در نهایت شاخص عملکرد تعریف شده به کمک تئوری کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی بهینه گردید. از مزایای روش به‌کار گرفته شده می‌توان به دستیابی به عملکرد بهینه در مشخصات مختلف رانندگی با استفاده از روش‌های عددی ساده اشاره نمود. عملکردهای گوناگون بدست آمده در شبیه سازی مانند صرفه‌جویی سوخت، توان‌های ورودی و خروجی، کنترل‌های اعمال شده به زیرسیستم‌ها و غیره مطابق با درک ما از مدل ارائه شده‌ی خودرو می‌باشد. نتایج به دست آمده درجه‌ی اعتماد را در مورد درستی مدل‌سازی و پیاده‌سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی افزایش می‌دهد. اما از نقاط ضعف این استراتژی حجم بالای محاسبات و زمان‌گیر بودن بهینه‌سازی می‌باشد که برای پیاده‌سازی در حالت زمان واقعی نیاز به پردازنده‌ای قوی خواهیم داشت.

مراجع

[1] Sciarretta A., Guzzella L., "*Control of Hybrid Electric Vehicles - A Survey of Optimal Energy-Management Strategies*", IEEE Control Systems Magazine, vol. 27, no. 2, pp. 60–70, 2007.

[2] Schouten, N. J., Salman, M. A., Kheir, N. A., "*Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic*" Control Engineering Practice, vol. 11, pp. 171–177,2003.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

[3] Poursamad, A., & Montazeri, M., "*Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles*" Control Engineering Practice, vol. 16, pp. 861–873, 2008.
[4] Paladini, V., Donateo, T., de Risi, A., Laforgia, D., "*Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development*" Energy Conversion and Management, vol. 48, pp. 3001–3008, 2007.
[5] Seiler, J., & Schr ¨oder, D., "*Hybrid vehicle operating strategies*", In Proceeding of the 15th Electric Vehicle Symposium (EVS '98), Bruxelles, France, 1998.
[6] Beck, R., Bollig, A., Abel, D., " *Comparison of two real-time predictive strategies for the optimal energy management of a hybrid electric vehicle.*" Oil & Gas Science and Technology — Revue de l'Institut Franc- ais du Petrole, vol. 62, No. 4, pp. 635–64, 2007.
[7] Chen, J. S., Salman, M., "*Learning energy management strategy for hybrid electric vehicles.*" In Proccedings of the IEEE vehicle power and propulsion conference, Chicago (Illinois, USA), 2005.
[8] Delprat, S., Guerra, T. M., Rimaux, J., "*Optimal control of a parallel powertrain from global optimization to real time control strategy*." In Proceed-ings of the IEEE vehicular transportation systems, Atlantic City, USA, 2001.
[9] Scordia, J., Trigui, R., Jeanneret, B., Badin, F., Malaquin, B., "*Systematic elaboration of online energy management laws for hybrid vehicles*." In Proceedings of the EVS21, 2005.
[10] Ambuhl, D., Guzzella, L.,. "*Predictive reference signal generator for hybrid electric vehicles.*" IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, No. 9, pp. 4730–4740, 2009.
[11] Paganelli, G., Guerra, T. M., Delprat, S., Santin, J. J., Delhom, M ., Combes, E., "*Simulation and assesment of power contol strategies for a parallel hybrid car*." IEE Journal of Automobile Engineering, IMechE, vol. 214, pp. 705–718, 2000.
[12] Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A., Guzzella, L., "*Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle*." Control Engineering Practice, vol. 13, pp. 41–53, 2005.
[13] Johannesson, L., Pettersson, S., Egardt, B., "*Predictive energy management of a 4QT series–parallel hybrid electric bus*." Control Engineering Practice, vol. 17, pp. 1440–1453, 2009.
[14] Lin, C.,C., Grizzle, J.W., Peng, H., KangLin, J., K., "*Power man-agement strategy for a parallel hybrid electric truck*." IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, No. 6, pp. 839–849, 2003.
[15] Uthaichana, K., Modeling and control of a parallel hybrid electric vehicle, PhD thesis, Purdue, West Lafayette, 2006.
[16] Uthaichana, K., R. DeCarlo, S. B., Pekarek, S., Zefran, M., "*Hybrid model predictive control tracking of a sawtooth driving profile for an HEV*." American Control Conference, pp. 967 – 974, 2008.
[17] Rolf Pfiffner, L. G., "*Optimal operation of CVT-based powertrains*." International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 11, No. 11, pp. 1003-1021, 2001.
[18] Coleman, M., Hurley, W.G., Lee C. K., "*An improved battery characterization method using a two-pulse load test*." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, No. 2, pp. 708–713,2008.
[19] Rao, R., Vrudhula, S.,. Rakhmatov, D, "*Battery models for energy aware system design*." IEEE Computer, vol 36, pp. 1019–1030, 2003.
[20] Pekarek, S., S. Bengea, K. U., DeCarlo, R., Zefran, M., "*Modeling of an electric drive for a hev supervisory level power flow control problem*." IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, USA, 2005.
[21] Anatone, M., Cipollone, R., Donati, A., Sciarretta, A., (). "Control-oriented modeling and fuel optimal control of a series hybrid bus." In Proc. of the SAE Conference, 2005.
[22] Jeon S.I., S.T. Jo, Park, Y.I., Lee, J.M., "*Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition*.", Journal of Dynamic Systems, Measure-ment and Control, Transactions of the ASME, vol. 124, pp. 141–149, 2001.
[23] Koot M, Kessels A, de Jager B, Heemels W, van den Bosch P, Steinbuch M., "*Energy management strategies for vehicular electric power systems*." IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, pp. 771–782, 2005.
[24] Qin, S. J., . Badgwell, T. A, "*A survey of industrial model predictive control technology*." Control Engineering Practice, vol 11, No. 7, pp. 733-764, 2003.
[25] Rahideh, A., Shaheed, M. H., "*Constrained output feedback model predictive control for nonlinear systems*." Control Engineering Practice, vol. 20, pp. 431 –443, 2012.
[26] Kermani S., Trigui R., Delprat S., Jeanneret B., "*Predictive energy management for hybrid vehicle.*" Control Engineering Practice, vol. 20,No.4, pp. 408–420., 2012.
[27] Nagy, Z.K. ; Allgower, F., "*Nonlinear model predictive control : From chemical industry to micro electronics*." in 43rd Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
[۲۸] تهامی، ف.، عابدی، م. ر .، **" تحلیل و طراحی روش کنترل پیش بین برای یکسو کننده دارای اصلاح ضریب توان با مبدل ارتقاء یافته ی شپارد-تیلور"**، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره اول، ۱۳۹۰.
[29] Abdollahi, A. D., Nikravesh, S.K.,.Menhaj, M.B, "*An Intelligent Control Strategy in a Parallel Hybrid Vehicle*", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.4, No.2, 2007.

زیرنویس‌ها

[1] Hybrid Electric Vehicle(HEV)
[2] Internal Combustion Engine(ICE)
[3] Real time
[4] Online
[5] Parallel HEV(PHEV)
[6] Hybrid Optimal Control Problem(HOCP)
[7] Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)
[8] Electric Drive(ED)
[9] Continuously Variable Transmission(CVT)
[10] Coupling Device and Differential(CDD)
[11] Wheels
[12] State Of Charge
[13] Aerodynamic drag
[14] Rolling resistance
[15] Set Point

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.6.4]