

# استراتژی کنترل پیش‌بین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی

محمدتقی نوده<sup>۱</sup> حسین قلی زاده نرم<sup>۲</sup> و امین حاجی زاده<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد- دانشکده‌ی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود

[M.t.nodeh@gmail.com](mailto:M.t.nodeh@gmail.com)

۲- دانشیار- دانشکده‌ی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود

[gholizade@shahroodut.ac.ir](mailto:gholizade@shahroodut.ac.ir)

۳- دانشیار- دانشکده‌ی تکنولوژی انرژی، دانشگاه آلبورگ دانمارک

[aha@et.aau.dk](mailto: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 سلسله‌مراتبی استفاده می‌شود. این نوع ساختار کنترلی شامل سه سطح نظارتی، هماهنگ‌کننده و سطح محلی می‌باشد. مدل غیرخطی و شاخص عملکرد موجود در مسئله‌ی مطرح شده، در سطح نظارتی این کنترل‌کننده فرمول‌بندی می‌گردند. وجود دینامیک گسسته‌ی مد عملکردی (موتوری-ژنراتوری) در خودروی الکتریکی هیبرید ما را ملزم به استفاده از یک مدل سوئیچی دو حالت 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. بهینه‌سازی شاخص عملکرد توسط تئوری کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی با استفاده از روش‌های عددی انجام می‌شود.

**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

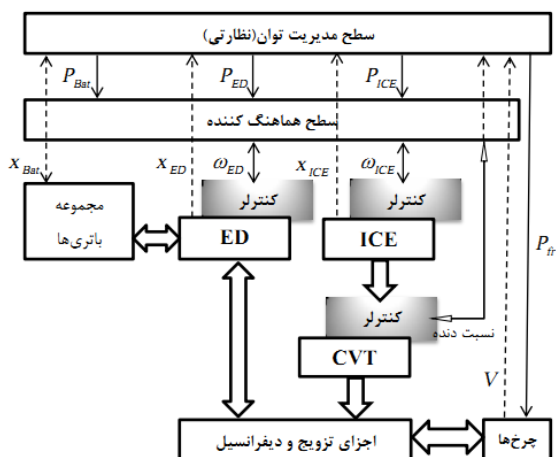
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - شاهرود - میدان هفت تیر - دانشگاه شاهرود - دانشکده‌ی برق و رباتیک

## ۱- مقدمه

در سیستم رانشی خودروی الکتریکی هیبرید (HEV) 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<sup>۲</sup>) تشکیل شده‌اند. از این‌رو استراتژی کنترل، یک الگوریتم مدیریت تقسیم توان ICE و ماشین‌های الکتریکی برای کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی 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 برنامه‌نویسی دینامیکی این قابلیت را فراهم می‌سازد. روش دوم طراحی الگوریتم‌های زمان واقعی<sup>۲</sup> و کنترل برخط<sup>۴</sup> خودرو می‌باشد [۱]. اکثر این روش‌ها مبتنی بر قوانین تجربی پیاده‌سازی 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 [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر، یک دسته‌بندی جدید از الگوریتم‌های زمان واقعی مبتنی بر استخراج کنترل بهینه در مطالعات پدید آمده است [۵-۸] که یکی از این روش‌ها استراتژی مینیمم‌سازی مصرف سوخت معادل می‌باشد [۹-۱۳].

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 پیش‌بینی 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<sup>۵</sup>) 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 بهینه هیبرید (HOCP<sup>۶</sup>) را توسط استراتژی کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی (NMPC<sup>۷</sup>) اجرا نماییم. در شکل (۱) اجزای ICE، درایو الکتریکی (ED<sup>۸</sup>) و سیستم انتقال متغیر پیوسته (CVT<sup>۹</sup>) دارای کنترل محلی بوده و توان خودرو از طریق اجزای تزویج و دیفرانسیل (CCD<sup>۱۰</sup>) به چرخ‌ها (W<sup>۱۱</sup>) منتقل می‌شود.



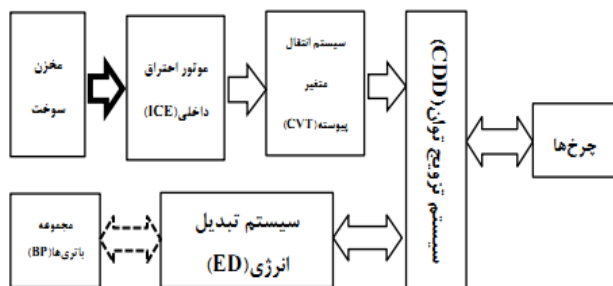
شکل (۱): ساختار کنترل سلسله مراتبی در PHEV

## ۲- مدل سازی 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 کنترل کننده‌های سطح محلی می‌باشد، جداسازی کنترل سطوح نظارتی و محلی مسئله‌ساز می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت مدل سازی 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 مسیر شیمیایی، 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]. مدل سازی 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

معادلات SOC و سرعت خودرو را وابسته به مد کاری مشروط خواهیم نمود.

#### ۴-۲- دینامیک ICE

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

$$\dot{P}_{ICE}(t) = -\frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}(t) + \frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}^{\max}(\omega_{ICE}) \cdot u_{ICE}(t) \cdot \text{eng}(\omega_{ICE}) \quad (3)$$

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

$$\omega_{ICE}(V, P_{ICE}) = (1-p)\omega_{ICE}^{\min}(V) + p\omega_{ICE}^{\max}(V) \quad (4)$$

$$p = \frac{P_{ICE}}{P_{ICE}^{\max}(\omega_{ICE}^{\max}(V))}$$

که در آن

#### ۵-۲- مدل باتری

برای مدل سازی باتری و یافتن معادلات انرژی نرمالیزه شده و SOC از مراجع [۱۸ و ۱۹] 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 می‌کند.

$$\dot{W}_{bat} = \frac{d_{3,v}}{W_{bat}^{\max}} (P_{bat,nom}^v)^2 - \{\ln(d_{1,v} \bar{W}_{bat} + d_{2,v}) + 2d_{3,v} P_{bat,nom}^v + d_{4,v}\} \frac{P_{bat}(t)}{W_{bat}^{\max}} \quad (5)$$

که در آن  $W_{bat}^{\max}$  ماکزیمم انرژی نامی،  $P_{bat,nom}$  توان نامی و  $P_{bat}(t)$  توان لحظه‌ای باتری می‌باشد. توان لحظه‌ای در مد موتوری ( $v=0$ ) مثبت و به ED توان تحویل داده و در مد ژنراتوری ( $v=1$ ) 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

موتوری ژنراتوری را برای PHEV در نظر گرفت. حال می‌توان این دو مد را این گونه 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 عملکردی 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.

#### ۳-۲- مدل سازی PHEV

از آن جایی که 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 موتور احتراقی ( $P_{ICE}(t)$ )، حالت شارژ باتری ( $SOC^{(v)}$ ) نرمالیزه ( $\bar{W}_{bat}(t)$ ) و سرعت خودرو ( $V(t)$ ) بیان شده است. برای نشان دادن مزایای استفاده از این نوع مدل سازی، می‌توان دینامیک‌های HEV را به صورت رابطه (۱) خلاصه نمود [۱۵ و ۱۶].

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{ICE} \\ \dot{\bar{W}}_{bat} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = f_{v(t)}([P_{ICE}, \bar{W}_{bat}(t), V(t)], u_{v(t)}(t)) \quad (1)$$

که در آن  $f_v(\dots)$  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.

$$u_{0/1}(t) = [\text{eng}(\omega_{ICE}(V, P_{ICE})) u_{ICE}(t), u_{fr}(t), u_{EM/GEN}(t)] \in [0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1] \quad (2)$$

در این رابطه  $u_{ICE}(t)$  ورودی کنترلی اعمالی به ICE برای تعیین سرعت آن نسبت به سرعت ماکزیمم،  $\text{eng}(\omega_{ICE}(V, P_{ICE}))$  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.  $\omega_{ICE}$  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

## ۸-۲- معادلات مسیر توان CDD و CVT

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

$$P_{cvt,out} = \eta_{cvt} \cdot P_{cvt,in} \quad (11)$$

که در آن  $\eta_{cvt}$  بازده،  $P_{cvt,in} = P_{ICE}$  توان ورودی CVT و

$P_{cvt,in} = P_{CDD,cvt}$  توان خروجی تحویلی به CDD می‌باشد.

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

$$P_{CDD,wh}^0(t) = \eta_{cdd1} P_{CDD,cvt}^0 + \eta_{cdd2} P_{CDD,ED}^0 \quad (12)$$

$$P_{CDD,ED}^1(t) = \eta_{cdd2} P_{CDD,cvt}^1 - \eta_{cdd1} P_{CDD,wh}^1$$

که در آن  $\eta_{cdd1}$  و  $\eta_{cdd2}$  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.

$$J_v(x_0, u, [t_0, t_f]) = g(t_0, x_0, t_f, x_f) + \int_{t_0}^{t_f} L_v(t, x, u) dt \quad (13)$$

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 آلاینده‌گی باشد [۲۲ و ۲۳]. 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:

$$L_v = C_v^v (V(t) - V^{des}(t))^2 + C_{ICE}^v (P_{fuel}^v)^2 + C_{cvt}^v (P_{cvt,loss}^v)^2 + C_{CDD}^v (P_{C,loss}^v)^2 + C_{ED}^v (P_{ED,loss}^v)^2 + C_{bat}^v (P_{bat,loss}^v)^2 + C_{fr}^v (P_{fr}^v)^2 \quad (14)$$

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

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

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

$$P_{bat}(t) = \begin{cases} P_{ED,in}^0 & v = 0 \\ -P_{ED,out}^1 & v = 1 \end{cases} \quad (6)$$

## ۶-۲- مدل خودرو

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

$$\dot{V} = -\left\{ \frac{k_{v1}}{m_c} V^2 + k_{v2} \cos(\alpha(t)) \right\} \text{sgn}(V) - g \sin(\alpha(t)) + \frac{1000}{m_c(V + \epsilon v)} (P_{CDD,wh}^v - P_{fr}) \quad (7)$$

که در آن  $\epsilon v$  ضریب تنظیم،  $m_c$  وزن خودرو،  $\frac{k_{v1}}{m_c} V^2$  کشش

آیرودینامیک<sup>۱۳</sup> نرمالیزه،  $k_{v2} \cos(\alpha(t))$  مقاومت چرخش<sup>۱۴</sup>،  $\alpha(t)$  زاویه‌ی شیب جاده،  $P_{CDD,wh}^v$  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.

$$P_{fr} = P_{fr}^{\max}(V) u_{fr}(t) \quad (8)$$

که  $u_{fr}$  تلاش کنترلی نرمالیزه شده ترمزی می‌باشد. 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.

$$P_{ED}^v = \eta_{ED}^v (\omega_{ED}) P_{ED,in}^v \quad (9)$$

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

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

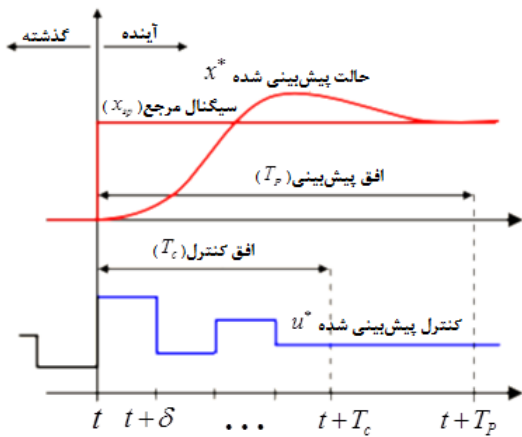
$$P_{ED,in}^0(\omega_{ED}) = P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}(V)) u_{EM}(t) \quad (10)$$

$$P_{ED,in}^1(\omega_{ED}) = P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}(V)) u_{GEN}(t)$$

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

#### ۴- کنترل پیش بین مدل غیر خطی (NMPC)

به طور 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 پایه‌ی MPC را نشان می‌دهد [۲۴].



شکل (۳): قاعده‌ی کلی مدل کنترل پیش بین

بر اساس اندازه‌گیری‌های بدست آمده در  $t$ ، کنترل کننده رفتار دینامیکی سیستم را در طول افق پیش بینی  $T_p$  پیش بینی 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  $t \geq 0$  امکان پذیر می‌باشد. به دلیل این که اغتشاشات و عدم قطعیت مدل فرآیند بین رفتار سیستم و رفتار پیش بینی شده باعث اختلاف می‌شود، 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  $\delta$  انجام می‌شود. با استفاده از اندازه‌گیری جدید در زمان  $t + \delta$ ، کل روش (پیش بینی و بهینه‌سازی) برای یافتن تابع ورودی جدید همراه با کنترل و افق پیش بینی 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 نمونه برداری 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

- در ترم  $C_{ICE}^v (P_{fuel})^2$  پارامتر  $P_{fuel}$  توان مصرفی در ICE بوده و در مجموع جریمه‌ی مصرف سوخت را نشان می‌دهد.
- در عبارت  $C_{cvt}^v (P_{cvt,loss})^2$  پارامتر  $P_{cvt,loss}$  توان تلفاتی CVT بوده و جریمه‌ی تلفات CVT را توصیف می‌کند.
- ترم  $C_{CDD}^v (P_{C,loss}^v)^2$  توسط توان تلفاتی CDD و  $(P_{C,loss}^v)$  جریمه‌ی تلفات در CDD را لحاظ می‌کند.
- در جمله  $C_{ED}^v (P_{ED,loss}^v)^2$  عبارت  $P_{ED,loss}^v$  توان تلفاتی ED بوده و جریمه‌ی تلفات ED را نشان می‌دهد.
- عبارت  $C_{bat}^v (P_{bat,loss}^v)^2$  با توجه به  $P_{bat,loss}^v$  که ناشی از تلفات شارژ و دشارژ باتری می‌باشد، توصیف کننده‌ی جریمه‌ی تلفات BP می‌باشد.
- در ترم  $C_{fr}^v (P_{fr})^2$  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  $(C_V^v, \dots, C_{fr}^v \geq 0)$ .

همان طوری که می‌دانیم متغیر کنترلی گسسته (مد عملکردی خودرو) فقط مقادیر صفر و یک را اختیار می‌کند. 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.

$$\min J(x_0, t) = \min_{u_0, u_1 \in \Omega, v \in [0,1]}$$

$$\{C_{bat, final} (\bar{W}_{bat}(t_f) - 0.6)^2 + \int_{t_0}^{t_f} L_E(t, x, u_0, u_1, v) dt\} \quad (15)$$

که در آن:

$$L_E(t, x, u_0, u_1, v) = (1-v(t))L_0(t, x, u_0) + v(t)L_1(t, x, u_1) \quad (16)$$

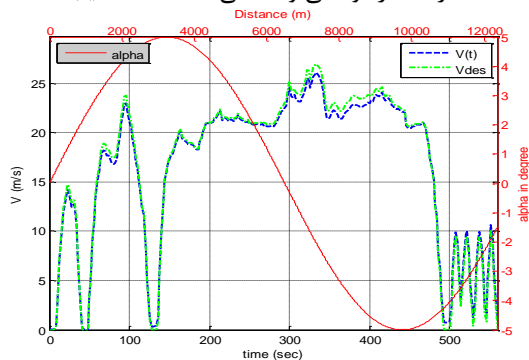
در نهایت، مجموعه معادلات دینامیکی مسیر توان سطح نظارتی HEV به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_E(t, x, u_0, u_1, v) \\ &= (1-v(t))f_0(x(t), u_0(t)) \\ &\quad + v(t)f_1(x(t), u_1(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

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

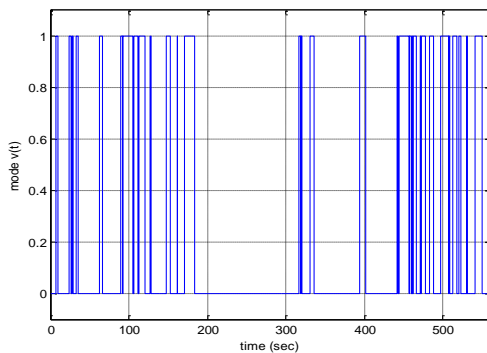
کننده به طور مطلوب و با خطای بسیار کم، سرعت درخواستی را فراهم نموده است.

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 نشان دهنده مسافت طی شده بر حسب متر (m) و مقدار شیب جاده بر حسب درجه (d) می باشند. در این شکل منحنی خط-فاصله سرعت لحظه‌ای 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 چرخه رانندگی را نشان می دهد. همان طوری که در معادلات مربوط به مدل سازی بیان شد، مد عملکردی داری دو حالت صفر (مد موتوری) و یک (مد ژنراتوری) می باشد.



شکل (۶): مد عملکردی خودرو

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

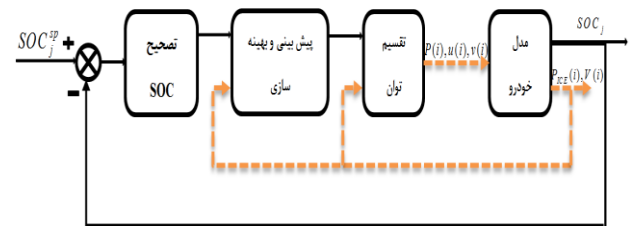
جدول (۱): مقادیر ضرایب تابع هزینه

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

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

جاده در طول افق پیش بینی می باشد. در نهایت حالت های واقعی در انتهای افق کنترل با شناخت شیب جاده از روی مدل شبیه سازی شده ی دقیق محاسبه خواهند شد.

آنچه که استراتژی NMPC را پیچیده می نماید، محدودیت نگهداری شارژ باتری می باشد. 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 نقطه ی تنظیم<sup>۱۵</sup> در شاخص عملکرد و استراتژی کنترل می گردد. در شکل (۴) فرآیند اعمال NMPC بر روی خودرو الکتریکی هیبرید را نشان می دهد [۲۶].



شکل (۴): بلوک دیاگرام NMPC بر روی PHEV

آنچه که در شکل (۴) به روشنی قابل رویت است وجود دو دوره ی نمونه برداری تند و کند می باشد. همان طور که در شکل (۴) دیده می شود، متغیرهای توان موتور احتراقی ( $P_{ICE}(t)$ ) و سرعت خودرو ( $V(t)$ ) در هر لحظه ی نمونه برداری به روزرسانی شده در حالی که سطح شارژ باتری (SOC) در انتهای افق کنترل (یعنی بعد از ۴ ثانیه) به روزرسانی می شود، که این امر به دلیل دینامیک کند باتری و سرعت انحراف SOC از سطح نامی کم بوده و می توان SOC را به صورت فیدبک حالت مدل سازی نمود. با توجه به مطالب گفته شده ضریب جریمه ی انحراف سطح SOC در ترم لحاظ شده ی شاخص عملکرد با مشکل روبه رو خواهد شد. برای غلبه بر این مشکل، با فرض مشخص بودن زمان نهایی، ضریب جریمه ی انحراف SOC را با استفاده از درون یابی خطی محاسبه نموده و به صورت تابعی خطی از زمان نهایی به صورت زیر تعریف می نماییم:

$$C_{Wbat,j} = \left( \frac{t_{f,j}}{t_f} \right) C_{Wbat,N} \quad (18)$$

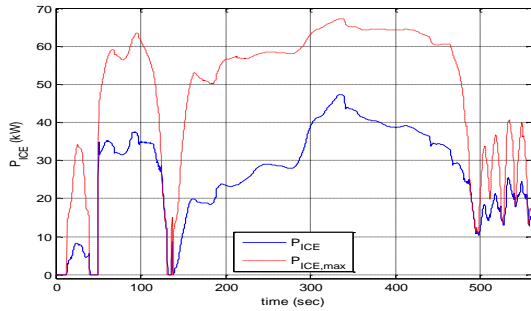
که در آن  $t_f$  زمان پایانی،  $t_{f,j} \in [4, \dots, t_f]$  زمان پایانی در هر افق کنترل NMPC و  $C_{Wbat,N}$  ضریب جریمه ی انحراف SOC از سطح نامی ۰/۶ در زمان نهایی می باشند [۲۷ و ۲۸].

## ۶- نتایج شبیه سازی

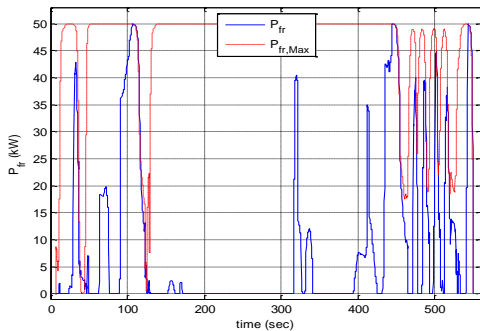
مشخصات رانندگی استفاده شده بر روی مدل شبیه سازی شده ی خودرو، سیکل استاندارد آمریکایی US06 در شرایط جاده با شیب سینوسی پنج درجه ای در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این شکل عمل ردگیری سرعت به خوبی به نمایش گذاشته شده و کنترل



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



شکل (۹): توان خروجی ICE



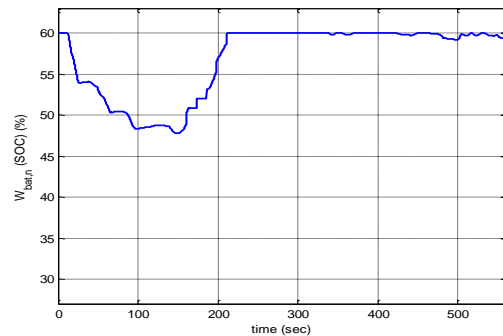
شکل (۱۰): توان ترمز اصطکاکی

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق از تئوری کنترل بهینه هیبرید برای حل مسئله کنترل و مدیریت توان در خودروهای الکتریکی هیبرید موازی استفاده شد. با بیان مسئله به صورت کنترل بهینه جایگزین، عمل ادغام دو شاخص عملکرد مد موتور و ژنراتوری را انجام شد. در نهایت شاخص عملکرد تعریف شده به کمک تئوری کنترل پیش بین مبتنی بر مدل غیرخطی بهینه گردید. از مزایای روش به کار گرفته شده می توان به دستیابی به عملکرد بهینه در مشخصات مختلف رانندگی با استفاده از روش های عددی ساده اشاره نمود. عملکردهای گوناگون بدست آمده در شبیه سازی مانند صرفه جویی سوخت، توان های ورودی و خروجی، کنترل های اعمال شده به زیرسیستم ها و غیره مطابق با درک ما از مدل ارائه شده ی خودرو می باشد. نتایج به دست آمده درجه ای اعتماد را در مورد درستی مدل سازی و پیاده سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی افزایش می دهد. اما از نقاط ضعف این استراتژی حجم بالای محاسبات و زمان گیر بودن بهینه سازی می باشد که برای پیاده سازی در حالت زمان واقعی نیاز به پردازنده ای قوی خواهیم داشت.

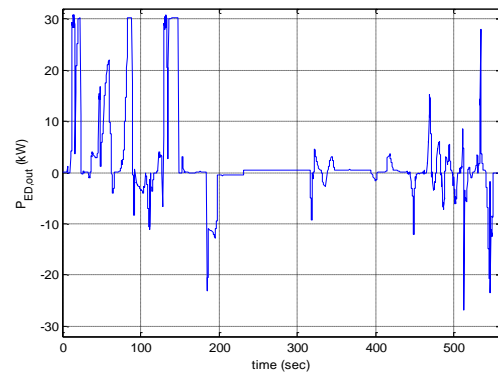
## مراجع

- [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.



شکل (۷): انرژی نرمالیزه شده ی باتری (SOC)

شکل (۸) توان ورودی/خروجی راه انداز الکتریکی (ED) را نشان می دهد. توان های مثبت نشان دهنده ی 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 می دهد که در ابتدای چرخه ی رانندگی ICE هیچ نقشی در تامین توان نداشته و ED به تنهایی توانایی فراهم نموده توان لازم را داشته است. بعد از تقریباً ۲۰ ثانیه موتور احتراقی به دلیل عدم توانایی تولید توان لازم توسط ED و کاهش SOC روشن شده و در محدوده ی 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 می گردد.

شاخص عملکرد به دست آمده با توجه به چرخه ی رانندگی مورد نظر برابر  $10^5 \times 2/1696$  و صرفه جویی سوخت  $20/54$  می باشد. پر واضح است که مقدار شاخص عملکرد و صرفه جویی 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].

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, Measurement 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 43<sup>rd</sup> Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2004.

[28] 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.

## زیر نویس ها

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

[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., Donato, T., de Risi, A., Laforgia, D., "Supercapacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development" Energy Conversion and Management, vol. 48, pp. 3001–3008, 2007.

[5] Seiler, J., & Schröder, 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 Français du Pétrole, vol. 62, No. 4, pp. 635–64, 2007.

[7] Chen, J. S., Salman, M., "Learning energy management strategy for hybrid electric vehicles." In Proceedings 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 Proceedings 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 control 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 management 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. Benga, K. U., DeCarlo, R., Zefran, M., "Modeling of an electric drive for a hev supervisory level

