

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
أَنْزَلَ هَذِهِ السُّورَةَ
وَهُوَ أَعْلَمُ بِالْمَعْنَى



دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : کنترل

استراتژی کنترل پیش‌بین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی

هیبرید موازی

دانشجو

: محمد تقی نوده

استاد راهنما :

حسین قلی زاده نرم

استاد مشاور:

امین حاجی زاده گسج

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۱

شماره : ۱۰۴۵/آ.ت.ب

تاریخ : ۹۱/۱۱/۲۴

ویرایش : ———

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

گرایش : کنترل

رشته : برق

محمد تقی نوده

تحت عنوان : استراتژی کنترل پیش بین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی

که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه : <u>قابل تمیز امتیاز ۱۵۱</u>)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد برتر	حسین میرزایی	۱- استاد راهنما
	استاد برتر	امیر حاجی زاده	۲- استاد مشاور
	استاد برتر	امیرحسین میرزایی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	امیرحسین میرزایی	۴- استاد ممتحن
	استاد برتر	علی حیدر میرزایی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده :

تقدیم بہ روح پاک پدر بزرگم، او کہ ستودنی بود!

و تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم آن ہا کہ مرا نمیدند و جایتم نمودند.

تعهد نامه

اینجانب **محمد مرتضی نور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق و انرژی** دانشکده مهندسی برق و

رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

استدلالی برای سنجش قابلیت اطمینان در سیستم‌های کنترل

تحت راهنمایی آقای دکتر **محمد سجاد حسینی** متعهد می شوم :

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

تاریخ : **۹۱، ۱۱، ۲۴**
امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

هدف ما در این تحقیق توصیف مدل سازی، کنترل سلسله مراتبی و پیاده سازی کنترل پیش بین مدل غیرخطی برای خودروی الکتریکی هیبرید موازی می باشد. کنترل سلسله مراتبی از سه سطح مشخص کنترل کننده های نظارتی، هماهنگ کننده و محلی تشکیل شده است، که در این پایان نامه فقط استراتژی کنترل در سطح نظارتی را ارتقا خواهیم بخشید. مدل خودروی الکتریکی هیبرید موازی شامل یک موتور احتراق داخلی، راه انداز و باتری الکتریکی، اجزای تزویج، دیفرانسیل و دینامیک های خودرو می باشد. برای مشخصات رانندگی (سرعت و شیب جاده) گوناگون در سیکل استاندارد آمریکایی، کنترل کننده ی سطح نظارتی جزئیات مربوط به حل مسئله ی مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی را محاسبه نموده، سپس مسیر بهینه ی توان در زیرسیستم ها را مشخص می کند. به عنوان مثال، مد عملکردی و تقسیم توان بین موتور احتراق داخلی و سیستم تبدیل انرژی را برای بدست آوردن عملکرد بهینه محاسبه نموده و یک مصالحه بین توان مصرفی، ردگیری سرعت مطلوب، نگهداری حالت شارژ باتری و محدودیت های رانندگی برای هر یک از سیکل های کاری برقرار می سازد. جواب این مسئله نیازمند یک مدل ریاضی اصولی از مسیر توان که انعکاس دهنده ی خواص فیزیکی زیرسیستم های استفاده شده در ساختار کنترل سلسله مراتبی است، می باشد. و در نهایت راه حل ارائه شده توسط کنترل سطح نظارتی منجر به ردگیری مشخصات توان ها توسط کنترل کننده های محلی زیرسیستم ها می شود.

مدل مسیر توان توسعه یافته حاصل پیشرفت های اخیر در زمینه ی تئوری کنترل بهینه ی هیبرید بوده، به طوری که مدهای عملکردی مختلف به عنوان ورودی کنترل کلاسیک مورد استفاده قرار می گیرند. در خودروی الکتریکی هیبرید موازی دو مد عملکردی (موتوری و ژنراتوری) وجود دارد، که عملکرد سیستم تبدیل انرژی را تعیین می کنند. و در نهایت، برای عملی ساختن محاسبات و اجرای

روش کنترل بهینه(مسیر توان) در زمان واقعی، از استراتژی کنترل پیش بین مدل غیرخطی استفاده نموده و سپس جواب بهینه‌ی مسئله‌ی مدیریت توان را محاسبه می‌نماییم.

کلمات کلیدی: کنترل پیش بین مدل غیرخطی - خودروی الکتریکی هیبرید موازی - مدیریت توان

—مدل غیرخطی

لیست مقالات استخراج شده

فهرست مطالب

چکیده	(خ)
لیست شکل ها	(س)
لیست جدول ها	(ش)
۱- مقدمه	۲
۱-۱ تاریخچه‌ی خودروی الکتریکی هیبرید	۳
۲-۱ ساختار سری و موازی	۵
۳-۱ سازمان دهی کلی پایان نامه	۷
۲- بررسی اجمالی مدل سازی و کنترل	۱۰
۱-۲ مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی هیبرید و استراتژی کنترل پیش‌بین	۱۳
۲-۲ معرفی کنترل محلی	۱۵
۳- مدل سازی دینامیکی خودروی الکتریکی هیبرید (HEV)	۱۸
۱-۳ مدل ریاضی هر یک از اجزای HEV	۱۸
۱-۱-۳ مدل دینامیکی موتور احتراقی (ICE)	۱۸
۲-۱-۳ مدل دینامیکی سیستم انتقال متغیر پیوسته (CVT)	۲۱
۳-۱-۳ مدل سازی دینامیکی موتور/ژنراتور	۲۳

۲۴	..... مدل سازی دینامیکی باتری	۳-۱-۴
۲۵	..... مدل سازی دینامیکی اجزای تزویج و دیفرانسیل (CDD)	۳-۱-۵
۲۶	..... مدل دینامیکی خودرو	۳-۱-۶
۲۶	..... مدل سازی در مدهای عملکردی HEV	۳-۲-۲
۲۷	..... دینامیک‌های ICE	۳-۲-۱
۲۸	..... معادلات مدل سازی در مد موتوری ($v=0$)	۳-۲-۲
۳۱	..... معادلات مدل سازی در مد ژنراتوری ($v=1$)	۳-۲-۳
۳۳	..... بازده ICE	۳-۳
۳۷	..... اعمال تئوری کنترل بهینه‌ی هیبرید در سطح نظارتی	۴-۱
۳۷	..... توصیف شاخص عملکرد برای مسئله‌ی مدیریت توان HEV	۴-۱
۴۰	..... تابع هزینه‌ی نهایی برای حل مسئله‌ی مدیریت توان در HEV	۴-۲
۴۲	..... کنترل پیش بین مدل غیرخطی	۵-۱
۴۲	..... مقدمه	۵-۱
۴۳	..... قاعده‌ی کلی کنترل پیش بین مدل غیرخطی (NMPC)	۵-۲
۴۴	..... NMPC حالت فیدبک	۵-۳
۴۸	..... پایداری NMPC با فیدبک حالت	۵-۴
۵۲	..... اعمال روش NMPC برای کنترل PHEV	۵-۵
۵۵	..... نتایج شبیه سازی	۶-۱
۶۵	..... نتیجه‌گیری	۷-۱
۶۶	..... مراجع	***

لیست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) تقسیم تلفات در خودروی احتراقی معمولی ۳
- شکل (۲-۲) ساختار کنترل سلسله مراتبی در HEV ۱۴
- شکل (۱-۳) منحنی تشخیص وضعیت موتور احتراقی ۱۹
- شکل (۲-۳) منحنی توان ماکزیمم بر حسب سرعت در موتور احتراقی [۱۲] ۲۰
- شکل (۳-۳) منحنی سرعت موتور احتراقی بر حسب سرعت خودرو ۲۲
- شکل (۴-۳) مسیر توان CDD (راست): در مد ژنراتوری، (چپ): در مد موتوری [۲۴] ۲۵
- شکل (۵-۳) تقریب بازده ICE در توان و سرعت مجاز [۱۲] ۳۵
- شکل (۱-۵) قاعده‌ی کلی مدل کنترل پیش‌بین ۴۴
- شکل (۲-۵) ناحیه‌ی جذب یک سیستم مرتبه‌ی دو ۵۰
- شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام NMPC بر روی PHEV ۵۲
- شکل (۱-۶) مشخصات رانندگی استاندارد US06 ۵۵
- شکل (۲-۶) مد عملکردی خودرو مطابق با مشخصات رانندگی ۵۶
- شکل (۳-۶) انرژی نرمالیزه شده‌ی باتری (SOC) مطابق با مشخصات رانندگی ۵۷
- شکل (۴-۶) توان ورودی/خروجی ED مطابق با مشخصات رانندگی ۵۸
- شکل (۵-۶) ورودی کنترل ED مطابق با مشخصات رانندگی ۵۸
- شکل (۶-۶) توان خروجی ICE مطابق با مشخصات رانندگی ۵۹
- شکل (۷-۶) ورودی کنترل ICE مطابق با مشخصات رانندگی ۶۰
- شکل (۸-۶) سرعت دوارن ICE مطابق با مشخصات رانندگی ۶۰

شکل (۶-۹) توان ترمز اصطکاکی مطابق با مشخصات رانندگی ۶۱

شکل (۶-۱۰) توان ورودی/خروجی CDD مطابق با مشخصات رانندگی ۶۲

شکل (۶-۱۱) توان بازیابی شده‌ی ترمزی مطابق با مشخصات رانندگی ۶۲

لیست جدول‌ها

جدول (۳-۱) پارامترهای ماکزیمم توان ورودی ED ۲۴

جدول (۳-۲) مقادیر پارامترهای باتری برای سیکل کاری US06 در مد موتوری ۲۹

جدول (۳-۳) مقادیر پارامترهای معادله دینامیکی خودرو ۳۰

جدول (۳-۴) مقادیر پارامترهای باتری برای سیکل کاری US06 در مد ژنراتوری ۳۱

جدول (۳-۵) ضرایب بازده ICE ۳۴

جدول (۴-۱) توصیف پارامترهای استفاده شده در ترمزهای جریمه ۴۰

جدول (۶-۱) مقادیر ضرایب جریمه‌ی استفاده شده و عملکرد به‌دست آمده‌ی تابع هزینه ۴۰

فصل اول:

مقدمه

مقدمه

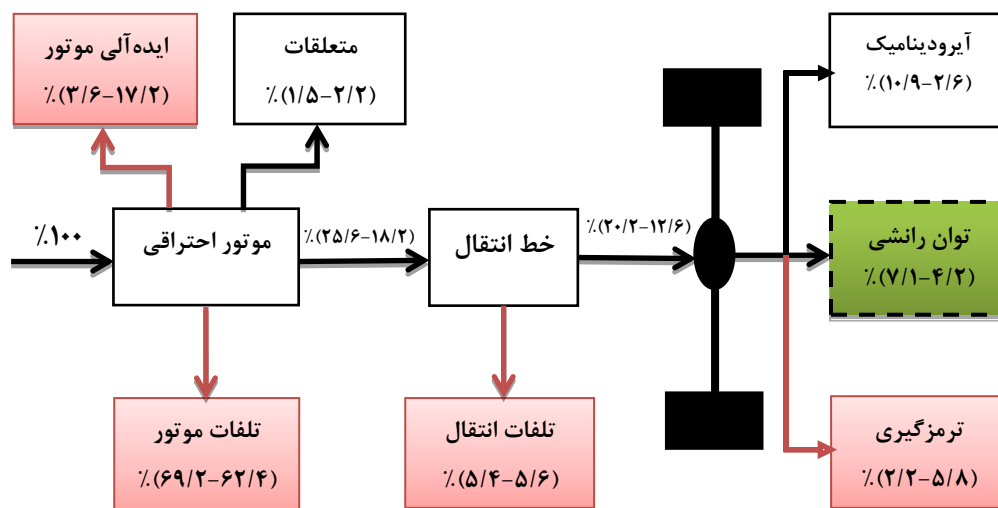
امروزه با توجه به آلودگی‌های ناشی از خودروهای احتراقی متداول، محدودیت‌های سوخت-های فسیلی و بازده کم این خودروها، کارخانه‌های خودروسازی گام مهمی در مقابله با این امر برداشته‌اند، که از جمله آن‌ها می‌توان به خودروهای الکتریکی هیبرید (HEV)^۱ اشاره نمود. HEV با داشتن ویژگی‌های خاص از جمله بازده بالا، آلاینده‌گی کم، مسافت قابل پیمایش بالا، ایمنی مطلوب و قیمت قابل رقابت با خودروهای متداول توجه صنایع خودروسازی را به خود جلب نموده‌اند. تاکنون بسیاری از خودروسازان بزرگ، موفق به تولید این خودروها در سطح انبوه شده‌اند. در کشور ما نیز به طور پراکنده در بعضی از دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و خودروسازان داخلی به صورت محدود و آزمایشی تعدادی HEV تولید شده، اما هنوز به مرحله تولید انبوه نرسیده‌است.

همان‌طور که از شکل (۱-۱) پیداست، خودروهای احتراقی درصد زیادی از توان خود را به صورت تلفات از دست می‌دهند، که سهم تلفات موتور احتراق داخلی (ICE)^۲ عددی بین ۶۲/۴٪ تا ۶۹/۲٪ توان ورودی به ICE می‌باشد. توان تلفاتی ناشی از ICE به دلیل عملکرد نادرست یا بیرون از ناحیه‌ی بازده ماکزیمم این جزء می‌باشد، بنابراین اگر بتوانیم عملکرد موتور را در ناحیه‌ی بازده ماکزیمم قرار دهیم، سهم بزرگی از این تلفات را به توان مفید رانشی خودرو تبدیل خواهیم کرد. از این‌رو HEV پیشنهادی است تا بتوان به کمک EM، ICE را در ناحیه‌ی بازدهی ماکزیمم قرار داد. علاوه بر آن HEV توانایی بازیابی قسمتی از توان ترمز اصطکاکی را دارا می‌باشد. همان‌گونه که در

^۱ Hybrid Electric Vehicle(HEV)

^۲ Internal Combustion Engine(ICE)

شکل (۱-۱) نشان داده شده است، به کارگیری سیستم انتقال پیوسته (CVT)^۱ نیز موجب صرفه جویی انرژی می‌گردد.



شکل (۱-۱) تقسیم تلفات در خودروی احتراقی معمولی

۱-۱ تاریخچه‌ی خودروی الکتریکی هیبرید

تحقیقات نشان می‌دهد عمر HEV از عمر اتومبیل‌های موجود بنزینی بیشتر است. اگرچه پیدایش اولیه‌ی این خودرو نتوانست مصرف سوخت را کاهش دهد، اما توانست برای رسیدن ICE به سطح بازدهی بالاتر و قابل قبول، ایده‌ی بزرگی را بوجود آورد.

اولین HEV گزارش شده در پاریس در سال ۱۸۹۹ می‌باشد، که توسط وندوویل^۲ و باربرهای الکتریکی پیرستلی^۳ ساخته شد. خودروی ساخته شده در شرکت اچ پیپر^۴ یک خودروی الکتریکی

^۱ Continuously Variable Transmission(CVT)

^۲ Vendovlli

^۳ Electric Carriage Priestly

^۴ H.Piper

هیبرید موازی (PHEV)^۱ بود، که اجزای آن را موتور بنزینی کوچک خنک شونده با هوا، موتور الکتریکی و باتری‌های سرب-اسیدی تشکیل می‌دادند [۱ و ۲]. نحوه‌ی کار به این صورت بود که باتری‌ها زمانی که خودرو در حالت سرازیری یا بدون حرکت قرار می‌گرفت، بوسیله‌ی موتور بنزینی شارژ می‌شدند و هنگامی که توان رانشی مورد نیاز بیشتر از توان موتور بنزینی بود، موتور الکتریکی توان اضافه مورد نیاز را تأمین می‌نمود. این خودرو قادر بود در طی ۱۰ ثانیه تا ۲۵ مایل شتاب بگیرد. HEV دیگر در سال ۱۸۹۹ معرفی شد، که یک خودروی الکتریکی هیبرید سری (SHEV)^۲ تجاری بود که توسط شرکت وندوویل و پیرستلی ساخته شد [۳].

در سال ۱۹۰۳ در پاریس PHEV دیگری توسط فریچمن کمیل^۳ ارائه شد. این خودرو توان خود را از یک باتری ۴۴ سلوله‌ی سربی-اسیدی می‌کشید، که توسط موتور الکلی ۴.۵ اسب بخاری شارژ می‌شد. هیبریدهای سری-موازی از سال ۱۶۹۱ تا ۱۹۸۸ ساخته شدند، که در نمونه‌های آخری از نیروی ترمزی الکتریکی استفاده شده می‌شد. یکی از بزرگترین مشکلات خودروهای مربوطه در دهه‌های نامبرده، برخورد با طراحی ماشین‌های الکتریکی و پیچیدگی خاص آن بود، چرا که هنوز الکترونیک قدرت به اندازه‌ی کافی پیشرفت نکرده بود، و ماشین‌های الکتریکی با سوئیچ‌ها و مقاومت‌های مکانیکی کنترل می‌شدند. دلایل فوق و پیشرفت سریع موتورهای احتراقی با قدرت و گشتاور بالا در آن دوره، همچنین قابلیت استارت بدون هندل آن‌ها و از همه مهم‌تر پایین بودن قیمت سوخت‌های فسیلی و مطرح نبودن آلودگی محیط زیست، سبب عدم توجه به خودروهای هیبرید گردید [۴ و ۵].

از سال ۱۹۶۰ به بعد بود که الکترونیک قدرت شروع به رشد کرد. در سال ۱۹۷۵ دکتر دیکتر وکبر^۴ با تحقیق روی HEV موفق به ساخت PHEV با ادوات الکترونیک قدرت گردید، که در آن از

¹ Parallel HEV(PHEV)

² Serial HEV(SHEV)

³ Frechman Comille

⁴ Dicter Vekber

ماشین DC ۱۵ اسب بخاری با تحریک جداگانه استفاده نمود. نمونه‌ی سری آن توسط دکتر ارنست وایکفیلد^۱ در سال ۱۹۶۷ ساخته شده بود [۶ و ۲].

در طی این سال‌ها HEV به صورت تجاری ساخته نشد و علاقه‌مندی‌ها به دلیل نگرانی‌های مهم محیط زیست به سمت خودروهای الکتریکی خالص متمایل شد. تحقیق‌ها تا سال ۱۹۸۰ ادامه یافت، ولی در طی این سال‌ها با وجود پیشرفت ماشین‌های الکتریکی مدرن، مخصوصاً باتری‌ها، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در تکنولوژی HEV صورت نگرفت. در سال ۱۹۹۰ روشن گردید که خودرو الکتریکی خالص هرگز به هدف ذخیره انرژی نخواهد رسید، سپس در پی یک کار اصولی با مشارکت خودروسازان پارتنر^۲ در آمریکا با حمایت دولت اولین HEV تولید شد [۷ و ۱].

شرکت فورد^۳ اولین HEV را وارد بازار کرد، و یکی از اولین خط تولیدهای این خودروی‌ها توسط دولت آمریکا بوجود آمد. پر اهمیت‌ترین پیشرفت‌ها در زمینه‌ی HEV و تبدیل آن به یک خودروی تجاری توسط کارخانه‌های ژاپنی‌ها انجام شد. در سال ۱۹۹۷، تویوتا خودروی پریوس^۴ و هوندا هم اینسایت^۵ و سیویس^۶ را در ژاپن عرضه کردند. این خودروها اکنون در دسترس بوده، و توانسته‌اند تا حد زیادی هدف کاهش مصرف سوخت را برآورده کنند.

۲-۱ ساختار سری و موازی

به‌طور کلی دو ساختار اصلی برای انتقال قدرت مبتنی بر نحوه‌ی قرارگیری ICE در خودروهای هیبرید وجود دارد. سیستم توان الکتریکی در ساختار سری شامل یک مجموعه

¹ Ernest Vykfield

² Partnership for a New Generation Vehicle(PNGV)

³ Ford

⁴ Pirus

⁵ Insight

⁶ Civic

باتری (BP)^۱، یک ژنراتور (GEN)^۲، و یک راه‌انداز الکتریکی (ED)^۳ که توانایی کار در هر دو عملکرد موتور الکتریکی (EM)^۴ و ژنراتوری را دارد، می‌باشد. در این ساختار از یک ICE کوچک که فقط گشتاور مورد نیاز برای چرخش ژنراتور و شارژ باتری استفاده می‌شود. مجموعه باتری نیز توان الکتریکی لازم برای تبدیل به توان مکانیکی توسط ED را برای انتقال به چرخ‌ها تامین می‌نماید. از این‌رو توان رانشی تنها توسط EM تامین شده و ماکزیمم توان رانشی به قدرت EM محدود می‌شود. بنابراین در این ساختار به EM قدرتمندتری نیازمندیم. استفاده از ساختار سری فقط عملیات انتقال توان را ساده نموده و چون ICE تنها گشتاور مورد نیاز ژنراتور را تامین می‌کند، آن را در ناحیه‌ی بازده ماکزیمم تنظیم می‌کنند.

برای ساختار موازی دو نوع طبقه‌بندی اساسی با عناوین طراحی پیش انتقال^۵ و پس انتقال^۶ بیان می‌شود [۸]. در طراحی پیش انتقال ICE قبل از این‌که به محور ورودی سیستم انتقال و کلاچ متصل شود، از طریق محور محرک به اجزای توزیع وصل می‌شود. و در طراحی دیگر، ICE از طریق سیستم انتقال به محور محرک اجزای توزیع و دیفرانسیل (CDD)^۷ متصل می‌شود. در اکثر خودروهای اخیر، یک CVT به‌جای جعبه دنده‌ی سنتی استفاده شده است. سیستم توان الکتریکی با یک محور محرک دیگر به CDD متصل شده تا با ICE ساختاری موازی را تشکیل دهند. به بیان دیگر زمانی که سیستم توان الکتریکی به صورت ED کار می‌کند، عملکردی مشابه به ICE دارد. به‌علاوه این‌که، توان تولید شده‌ی اضافی ICE در نرخ بهره‌وری سوخت^۸ را می‌توان با قرار دادن ED به صورت GEN دوباره در BP شارژ کرد. مزایای اصلی ساختار موازی بر سری در مقالات مرجع [۹ و ۱۰] شرح داده شده‌اند. از

¹ Battery Pack (BP)

² Generator (GEN)

³ Electric Drive (ED)

⁴ Electric Motor (EM)

⁵ Pre-transmission

⁶ Post-transmission

⁷ Coupling Device and Differential (CDD)

⁸ Fuel efficient rate

آن جایی که در ساختار موازی با ICE و ED کوچکتری می توان به ماکزیمم توان ساختار سری دست یابیم، استفاده از PHEV را بر SHEV برتری دارد. علاوه بر این، در SHEV به یک ED و GEN مستقل نیازمندیم، در حالی که در PHEV یک ED کفایت می نماید. از محدود عیب های ساختار موازی نیاز به سیستم انتقال چند دنده ای است که برای تامین توان درخواستی آنی، عملکرد ICE را به اجبار در نواحی ناکارآمد سوخت قرار می دهد. با این حال، برای اینکه ICE همواره در نواحی کارآمد سوخت قرار داشته باشد، CVT را می توان در ساختار موازی پس انتقال قرار داد.

بنابراین، بهبود بهره وری سوخت و کاهش انتشارات آلاینده ها با حفظ قابلیت های رانندگی چنین سیستمی پیچیده و محدودیت های فراتر از الگوریتم های کنترلی با قوانین پایه بوده و این را چالش مسئله معرفی می نماییم. در نظر گرفتن یک مدل مبتنی بر مسیر توان در این کار نتیجه ی مرسوم (برای مصالحه برقرار کردن بین پیچیدگی مدل و دقت) در مهندسی کنترل می باشد. در قسمت مدل سازی برای پیشنهاد روش های کنترل بهینه ی بهتر به بررسی دقیق تر دینامیک زیرسیستم های HEV می پردازیم.

۳-۱ سازماندهی کلی پایان نامه

سازماندهی این پایان نامه به شرح زیر انجام می شود. در فصل دوم به بررسی اجمالی مدل سازی و کنترل HEV با استفاده از استراتژی کنترل سلسله مراتبی پرداخته، و سپس در فصل سوم جزئیات مدل سازی HEV (زیرسیستم های حلقه بسته) در سطح نظارتی را بررسی خواهیم نمود [۲۴-۲۶]. در فصل چهارم نیز خلاصه ای از تئوری کنترل هیبرید بهینه^۱ توسعه یافته و نحوه ی فرموله کردن آن در سطح نظارتی را بیان می نماییم [۱۵]. در فصل پنجم به بررسی استراتژی کنترل پیش بین مبتنی بر

¹ Hybrid Optimal Control Problem(HOCP)

مدل غیرخطی (NMPC)^۱ و پایداری آن پرداخته، و سپس در همین فصل استراتژی کنترلی را روی HEV پیاده‌سازی خواهیم کرد. و کاربرد آن در حل مسئله کنترل مدیریت توان (PMCP)^۲ در HEV خواهیم پرداخت. و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و استراتژی کنترلی را در قالب شکل و نمودار نمایش خواهیم داد.

^۱ Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

^۲ Power Management Control Problem (PMCP)

فصل دوم:

بررسی اجمالی مدل سازی و کنترل

بررسی اجمالی مدل‌سازی و کنترل

در این تحقیق، در مسیر توان PHEV از یک ICE (۴ سیلندر ۱.۹ لیتری دیزلی) و یک مجموعه باتری با درایو الکتریکی (BPED)^۱ استفاده شده است. از آنجایی که صرفه‌ی اقتصادی نیز اهمیت دارد، از موتور دیزلی به جای موتور بنزینی استفاده می‌کنیم. از طرف دیگر، CVT را طوری انتخاب می‌کنیم که توانایی کار در حداکثر گشتاور تولیدی توسط را دارا باشد [۱۱]. واسط ED با مجموعه باتری شامل ۳۰ عدد باتری سربی-اسیدی ۱۲ ولتی ۱۳ آمپر ساعتی سری می‌باشد.

از نیازهای اولیه‌ی این پایانه بررسی مدل‌سازی و طراحی کنترل سلسله مراتبی در HEV می‌باشد. سه سطح مشخص سلسله مراتبی سطوح نظارتی، هماهنگ کننده و محلی می‌باشند. که در این تحقیق فقط به بیان سطوح نظارتی و محلی می‌پردازیم. کنترل سطح نظارتی در HEV برای حصول عملکرد بهینه در حضور شرایط جاده‌ای شناخته و ناشناخته و خواسته‌های راننده شامل متغیرهای پیوسته و گسسته کلاسیک در توافق با متغیرهای منطقی یا تصمیم‌گیری مد عملکردی را تعیین می‌نماید. ایده‌ی مسئله‌ی کنترل مسیر توان سطح نظارتی در سال‌های اولیه خلق شد [۱۲ و ۱۳].

و مسئله‌ی کنترل HEV با اتخاذ دو سطح (نظارتی و محلی) سلسله مراتبی مورد تحلیل قرار گرفت. روش به کار رفته در مقالات با استفاده از مسئله‌ی برنامه ریزی شده‌ی دینامیکی در سطوح مسیر توان لحظه‌ای مربوط به بازده و تلفات در هر زیرسیستم و حالت شارژ باتری (SOC)^۲ می‌باشد. با این حال در مقایسه با [۱۳]، استفاده از بهینه‌سازی دینامیکی موجب برقراری مصالحه بین صرفه‌جویی سوخت و کاهش انتشار گازهای آلاینده در سطح نظارتی می‌شود. در این تحقیق حل مسئله‌ی مدیریت توان برای مسیر توان بهینه در سطح نظارتی شدیداً به مسیر توان یا راندمان سرعت خودروی استفاده شده

^۱ Battery Pack Electric Drive (BPED)

^۲ State Of Charge (SOC)

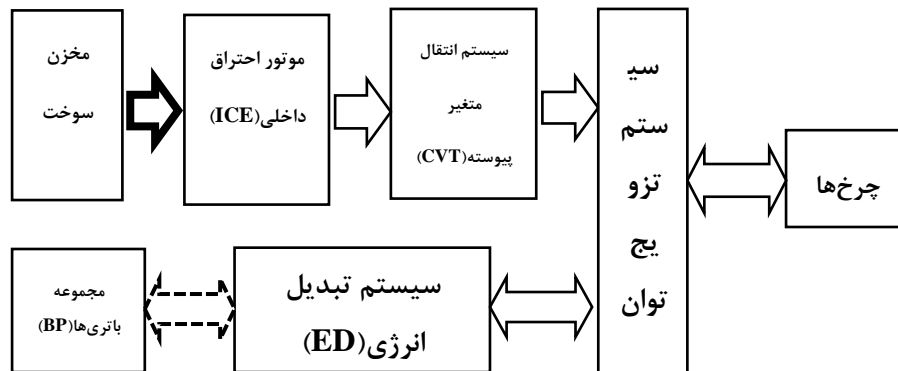
وابسته است. علاوه بر این، با توجه به مرجع [۱۲] مدل کاملاً دینامیکی مسیر توان شامل معادلات دیفرانسیل توان ICE، سرعت خودرو و SOC در طول مسیر توان یا سرعت وابسته به بازده سطح دیگری از پیچیدگی برای این مسئله‌ی مورد بحث می‌باشند. دیگر مدل‌های استاتیکی از مسیر توان HEV را می‌توان در مقالات اخیر مشاهده نمود [۱۴ و ۱۴].

در مرجع [۱۴]، برای حل مسئله‌ی مدیریت انرژی هر دو برنامه‌ریزی دینامیکی و مربعی در مدل مسیر توان استاتیکی توسعه یافته‌اند. مخصوصاً، مسیر توان ICE همانند یک مسیر توان لحظه‌ای از سوخت مصرفی محاسبه شده توسط یک نقشه‌ی استاتیکی غیرخطی در شرایط توان ICE و سرعت آن نشان داده شده‌است. اشکال عمده در فرضیات مسیر توان استاتیکی دست کم گرفتن تلفات واقعی در هزینه‌ی سوخت و افزایش سطح انتشار آلاینده‌ها به دلیل وجود دینامیک‌های گذرا در مسیر توان ICE می‌باشد. آنچه این تحقیق را ارزشمند می‌سازد، ایجاد مدل مسیر توان دینامیکی برای PHEV و استفاده از تئوری توسعه‌ی یافته‌ی اخیر HOCP [۱۵]، و نیز استراتژی NMPC [۴۵-۵۰] برای حل مسیر توان بهینه‌ی در سطح نظارتی می‌باشد. علاوه بر این‌ها، تکنیک‌هایی دیگر مبتنی بر ترکیب توان و گشتاور برای مدل‌سازی در مقالات آمده‌اند [۱۶ و ۱۷]. اگرچه این نوع مدل‌سازی نسبتاً ساده‌تر است، اما مشکل آن پیچیدگی در کنترل HEV می‌باشد. توضیحات بیشتر از نحوه‌ی مدل‌سازی و استراتژی کنترل آن در مقالات مربوطه آمده است [۱۸ و ۱۹].

مشخصات رانندگی به کارگرفته شده در شبیه‌سازی سیکل استاندارد آمریکایی (US06)^۱ می‌باشد. در این استراتژی نیز کنترل‌کننده سطح نظارتی برای دستیابی به عملکرد بهینه عمل تقسیم توان را بین ICE و BPED انجام می‌دهد. یا به عبارت دیگر یک مصالحه بین انرژی مصرفی، تطبیق قابلیت‌های رانندگی و محدودیت‌ها، ردگیری مشخصات رانندگی و نگهداری SOC در محدوده‌ی تعیین شده برقرار می‌نماید، تا در کمترین زمان ممکن ED وضعیت EM یا GEN خود را یافته و انرژی ترمزی را بازیابی نماید. این فرآیند را مسئله‌ی کنترل مدیریت توان (PMCP) می‌نامند. نحوه‌ی ترکیب و جهت-

¹ US06 Drive Cycle

های مسیر توان در شکل (۱-۲) نمایش داده شده، که حاصل از پنج مد کاری PHEV ذکر شده در مقالات مختلف می‌باشد [۱۳]. این پنج مد کاری عبارتند از: مد EM، مد موتور احتراقی، مد موتور الکتریکی و احتراقی، مد شارژ باتری توسط موتور احتراقی و مد بازگشت انرژی ترمزی.



(۱) خط پر رنگ: مسیر شیمیایی (۲) خط کم رنگ: مسیر مکانیکی (۳) خط فاصله: مسیر الکتریکی

شکل (۱-۲) ساختار خودروی هیبرید الکتریکی موازی (PHEV)

در این تحقیق مدل مسیر توان نظارتی HEV با سه متغیر حالت توان موتور احتراقی ($P_{ICE}(t)$)، حالت شارژ باتری نرمالیزه ($\bar{W}_{bat}(t)$) و سرعت خودرو ($V(t)$) بیان شده است. برای نشان دادن مزایای استفاده از این نوع مدل‌سازی، می‌توان دینامیک‌های HEV را به فرم زیر خلاصه نمود.

$$\begin{aligned} \dot{P}_{ICE} &= f_{ICE}(P_{ICE}) \\ \dot{\bar{W}}_{bat} &= f_{bat}^v(P_{ED}) \\ \dot{V} &= f_{Vehicle}^v(P_{ICE}, P_{ED}) \end{aligned} \quad (۱-۲)$$

توابع سمت راست دینامیک‌های مربوط به زیرسیستم‌های اصلی را توصیف می‌نمایند. دینامیک‌های مختلف نتیجه‌ی عملکرد ED در مد موتوری یا ژنراتوری است، که به ترتیب توسط بالانوشته‌ی $v=0,1$ نمادگذاری شده‌اند. بنابراین می‌توان تطبیق ساده‌ای از مدهای عملکردی بیان شده در [۱۳] و نحوه‌ی اجرای رابطه (۱-۲) را به شرح زیر توصیف نمود.

(۱) برای $v=0$: در رابطه (۱-۲) مد فقط موتور احتراقی با $P_{ED} = 0$ و مد فقط EM نیز با

$P_{ICE} = 0$ متناظر می‌باشند. در مد موتور کمکی هر دوی P_{ICE} و P_{ED} اکیداً مثبت‌اند.

(۲) برای $v=1$: در رابطه (۱-۲) مد بازگشت انرژی ترمزی با $P_{ED} < 0$ و $P_{ICE} \approx 0$ و مد حالت

شارژ باتری توسط موتور احتراقی با $P_{ED} < 0$ و $P_{ICE} > 0$ متناظر می‌باشند [۲۶].

بنابراین با انتخاب مناسب دینامیک‌ها در هر مد کاری می‌توان با استفاده از رابطه (۱-۲) و تنها با دو مد عملکردی به اغلب رفتارهای توصیف شده در [۱۳] پی برد. این رابطه از پیچیدگی مدل مسیر توان مبتنی بر ترکیب توان و گشتاور به شدت می‌کاهد [۱۶ و ۱۷]. در اغلب اوقات فرموله سازی مسیر توان به روش فوق، مسئله‌ی مدیریت توان را در موارد مسیره‌های توان و بازده وابسته به سرعت به طور کامل توصیف می‌نماید [۱۴ و ۲۰]. علاوه بر این مجموعه‌ی استفاده شده در HOCP برای دستیابی به تابع هدف چندگانه در HEV می‌باشد.

۱-۲ مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی هیبرید و استراتژی کنترل پیش بین

تبعیت از این ایده موجب جایگزینی HOCP به جای مسئله‌ی اصلی (سوئیچ زنی) در مجموعه پارامترهای مسئله می‌شود. مجموعه‌ی پارامترهای مسئله تابع یک قاعده‌ی ماکزیمم‌سازی در تئوری کنترل بهینه‌ی کلاسیک می‌باشند، که در مرجع [۱۵] مطرح شده‌اند. برای دستیابی به مقادیر این پارامترها از تابع هزینه‌ای که شامل معادلات حالت پیوسته در زمان با دو مقدارمرزی (وضعیت نهایی و شرایط اولیه) و مجموعه معادلات الحاقی می‌باشد، استفاده خواهد شد.

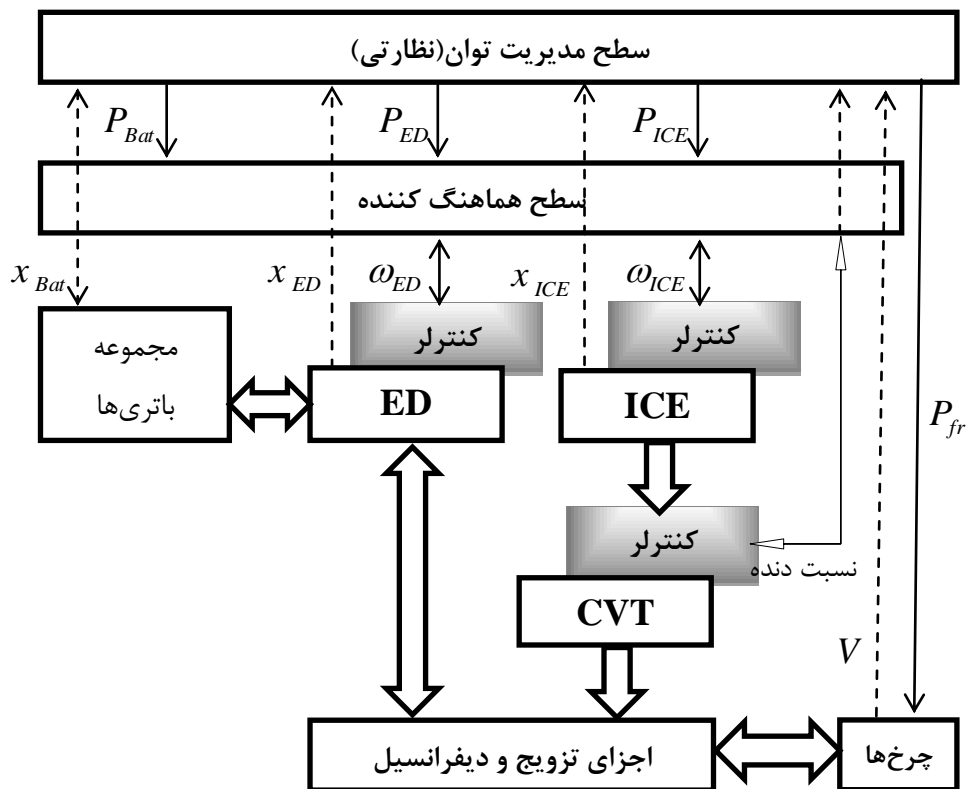
در بسیاری از مقالات جواب عددی مدیریت توان در HEV با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی^۱ یا برنامه‌ریزی مربعی^۲ تعیین شده است [۱۲-۱۴]. معمولاً در این‌گونه مطالعات، پس از

¹ Dynamic programming

² Quadratic programming

تعیین جواب‌های عددی مرحله‌ی رسیدگی به آن‌ها وجود ندارد چرا که جواب‌های تعیین شده بهینه یا نزدیک به بهینه می‌باشند. یک روش که به رسیدگی بهینه‌گی جواب‌ها می‌پردازد، ایجاد هامیلتونی در مسئله با استفاده از تابع هزینه و ادغام معادلات الحاقی با حالت‌ها و ورودی‌های شناخته شده از جواب‌ها می‌باشد، برای بررسی بیشتر به مرجع [۲۱] مراجعه نمایید.

پس از دستیابی به مسیرهای توان بهینه با کمک استراتژی NMPC، کنترل سطح نظارتی از طریق سطح هماهنگ کننده وظیفه‌ی هر کدام کنترل کننده‌ی محلی مختص به هر زیرسیستم‌ها را برای ردیابی مشخصات مسیر توان ارسال می‌نماید. شکل (۲-۲) ساختار کنترل سلسله مراتبی HEV را در سه سطح نظارتی، هماهنگ کننده و کنترل کننده‌های محلی زیرسیستم‌ها نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۲) ساختار کنترل سلسله مراتبی در HEV

۲-۲ معرفی کنترل محلی

ما باید در طراحی مدل سطح نظارتی برای حل مسئله کنترل مسیر توان از فرضیات زیرسیستم‌ها و اثرات متقابل آن‌ها تبعیت نماییم. یکی از مهمترین آن‌ها انتخاب کنترل حلقه بسته برای زیرسیستم‌های محلی اصلی می‌باشد. از این‌رو ارتباط بین توان‌های ورودی و خروجی زیرسیستم‌ها به عنوان یک نظارتگر در نوع حلقه بسته ظاهر می‌شود. ضمناً، در سطح نظارتی با حل مسئله‌ی بهینگی مسیر توان، کنترل لازم برای هر یک از زیرسیستم‌ها جهت ردگیری توان مرجع یا درخواستی تولید می‌شود. ترکیب رفتار زیرسیستم‌های حلقه بسته تضمین می‌کند، که درخواست‌های سطوح توان توسط نظارتگر همیشه اجرا شده و از تعارض احتمالی بین زیرسیستم‌های محلی همبسته جلوگیری می‌نماید.

استراتژی کنترل مورد بحث در این پایانامه با توجه به مرجع [۱۳] برای ردگیری توان درخواستی به مینیمم‌سازی مصرف سوخت واقعی و محدود نمودن انتشارات آلاینده‌ها می‌پردازد و این محاسبات توسط نظارتگر در سطح محلی ICE انجام می‌شود. دستیابی به تابع هدف توسط یک تابع هزینه‌ی مناسب که انعکاس دهنده‌ی عملکرد مطلوب مدل است در سطح محلی ICE انجام می‌شود. از آنجا که متغیرهای محلی زیرسیستم ICE منحصر به فرد نبوده و ترکیبی از نرخ مسیر توان، سرعت جریان هوا، سطح چرخش گاز اگزوز و غیره می‌باشند، می‌توان در همان سطح دستور توان ICE که توسط نظارتگر دیکته شده را با کنترل محلی ICE در مورد ترکیب متغیرهای محلی برای دستیابی به عملکرد مطلوب را تصمیم‌گیری نمود. یک روش حل این مسئله برای افزایش توان ICE این است که معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی مدل موتور بنزینی نشانگر رابطه‌ی دقیق بین متغیرهای محلی، توان موتور و انتشارات آلاینده‌ها باشد. به خصوص برای کاهش انتشارات خروجی کنترل‌کننده‌های محلی بر اساس متغیرهایی از مدل‌های محلی و معادلات کنترلی طراحی می‌شوند که تاثیر صریح و آشکاری در تولید گازهای گلخانه‌ای دارند. بنابراین کنترل محلی علاوه بر ردگیری مشخصات توان خواسته

شده توسط سطح نظارتی، برای دستیابی به عملکرد مطلوب ICE با انتشارات کم باید به طور همزمان تلاش کند. در خلاصه‌ی مرجع [۱۱]، استراتژی کنترل کننده‌ی محلی کلاسیک برای زیر سیستم‌های CVT شامل پوش سرعت، سیگنال ردگیری و از بین بردن کوبش‌های ردگیری (ضربات ناشی از درگیر شدن محورهای توان) می‌باشد. هدف از هر استراتژی کنترل برقرار کردن مصالحه بین توان درخواستی و بازده سوخت است. قابل توجه است که برای CVT می‌توان از استراتژی کنترل پیچیده‌تری مانند شاخص عملکرد بهینه شده‌ی کنونی استفاده نمود. با این حال چنین استراتژی پیچیده‌ای نیازمند یک سطح اضافی در لایه‌های کنترل بوده و فراتر از محدوده‌ی مطالعات این پایانامه می‌باشد. برای کنترل کننده‌ی محلی ED استراتژی کنترل ماکزیمم گشتاور/آمپر (MTA)^۱ انتخاب شده است [۲۲]. این استراتژی بر اساس موارد زیر در محدوده‌ی سرعت مورد نیاز انتخاب می‌شود [۲۳]:

(۱) عدم حساسیت نسبت به تغییرات پارامترهای ماشین

(۲) پاسخ نسبی سریع گشتاور

(۳) راندمان نسبتاً بالا

در فصل سوم نشان خواهیم داد که بازده ED چگونه تحت MTA موجب کاهش ورودی و خروجی مسیر توان در مد موتوری و ژنراتوری می‌گردد. توجه داشته باشید که ارتباط بین توان‌های ورودی و خروجی مختلف و بازده تحت یک استراتژی کنترل محلی ED متفاوت تعیین می‌شوند.

¹ maximum torque/amp (MTA)

فصل سوم:

مدل سازی دینامیکی خودروی الکتریکی

پسرید

مدل سازی دینامیکی خودروی الکتریکی هیبرید (HEV)

اولین گام در طراحی یک استراتژی کنترل، مدل سازی سیستم محرکه‌ی رانشی HEV می‌باشد. بر این اساس تاکنون روش‌های متفاوتی برای مدل سازی زیرسیستم‌ها استفاده شده‌است. ما در این فصل با توجه به نوع نیاز برای طراحی استراتژی کنترل سلسله مراتبی است، به تعیین معادلات دینامیکی هر یک از اجزا خواهیم پرداخت.

۱-۳ مدل ریاضی هر یک از اجزای HEV

در این بخش به بررسی مدل ریاضی و تعریف پارامترهای موجود در هر یک از اجزای HEV به طور جداگانه می‌پردازیم. در این مدل سازی باید دقت داشت که از دقیق ترین مدل برای هر جزء استفاده گردد، چرا که ممکن است یک اشتباه کوچک تغییراتی بزرگ در نقطه‌ی توزیع اجزاء به وجود آورد.

۱-۱-۳ مدل دینامیکی موتور احتراقی (ICE)

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

$$\dot{P}_{ICE}(t) = -\frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}(t) + \frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}^{des}(t) \quad (1-1-3)$$

(۱) τ_{ICE} تاخیر نامی ICE است که به سرعت و توان موتور وابسته بوده و مقدار آن در بازه‌ی

$[7.5ms, 37.5ms]$ قرار می‌گیرد.

(۲) $P_{ICE}^{des}(t)$ توان درخواستی راننده است، به کمک کنترل سطح نظارتی می‌شود.

$$P_{ICE}^{des}(t) = P_{ICE}^{max}(\omega_{ICE}) \cdot u_{ICE}(t) \cdot eng(\omega_{ICE}) \quad (2-1-3)$$

که در نهایت داریم:

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

(3) $u_{ICE}(t)$ ورودی کنترل نرمالیزه شده و مقدار آن در بازه‌ی $[0, 1]$ قرار می‌گیرد.

(4) $eng(\omega_{ICE})$ وضعیت کنترلی موتور احتراقی می‌باشد، که صفر بودن آن نمایانگر موتور

خاموش و یک بودن آن نشان‌دهنده‌ی موتور روشن است. از آن‌جا که موتور واقعی در

سرعت کمتر از 800 دور دقیقه نمی‌تواند روشن باشد آنگاه خواهیم داشت:

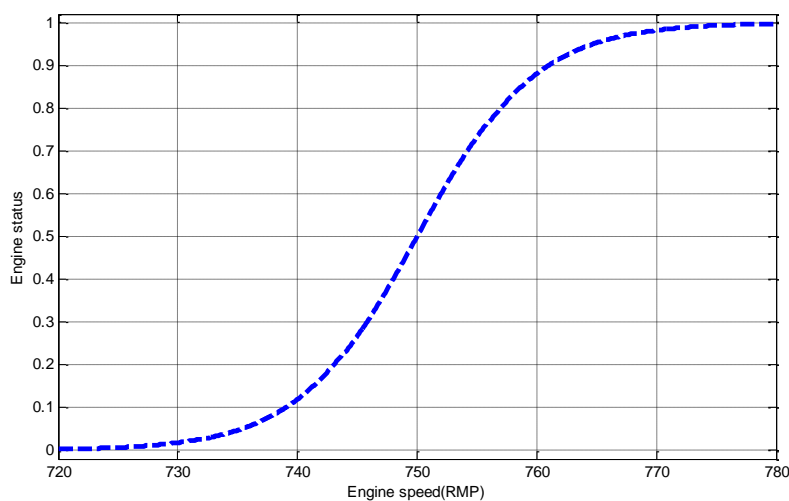
$$eng(\omega_{ICE}) = \begin{cases} 1 & \omega_{ICE} \geq 800 \\ 0 & other \end{cases} \quad (4-1-3)$$

در اجرای بهینه‌سازی برای $eng(\omega_{ICE})$ نیاز به تابعی پیوسته ما را ملزم به استفاده از رابطه‌ی

زیر می‌نماید.

$$eng(\omega_{ICE}) = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{\omega_{ICE} - 750}{10} \right) \right) \quad (5-1-3)$$

شکل (1-3) نرخ تغییرات $eng(\omega_{ICE})$ را در دوره‌های ابتدایی راه اندازی ICE نشان می‌دهد.



شکل (1-3) منحنی تشخیص وضعیت موتور احتراقی

(۵) $P_{ICE}^{max}(\omega_{ICE})$ نیز حداکثر توان تولیدی ICE است، که وابسته به سرعت آن می‌باشد. این

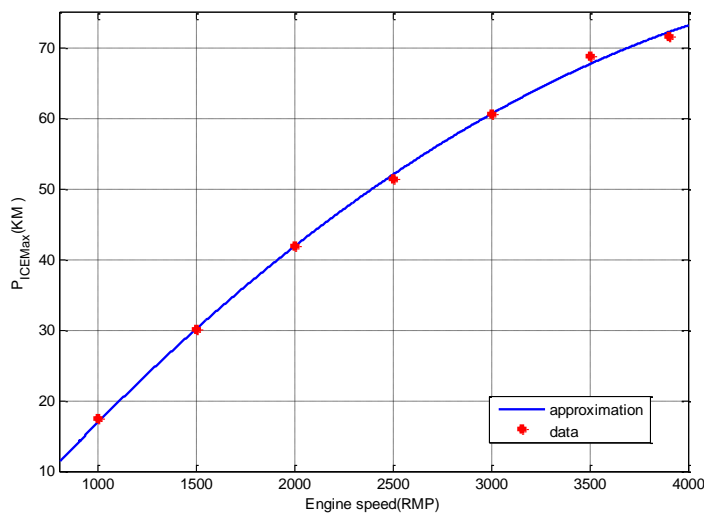
توان برای یک خودرو خاص که منحنی توان ماکزیمم ICE بر حسب سرعت آن در

شکل (۲-۳) رسم شده، از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$P_{ICE}^{max}(\omega_{ICE}) = a_1 \left(\frac{\omega_{ICE}}{\max(\omega_{ICE})} \right)^2 + a_2 \left(\frac{\omega_{ICE}}{\max(\omega_{ICE})} \right) + a_3 \quad (۶-۱-۳)$$

که در آن $\max(\omega_{ICE}) = 3900$ ، $a_1 = -49.5$ ، $a_2 = 136$ ، و $a_3 = -14.2$ می‌باشند، و منحنی

تغییرات $P_{ICE}^{max}(\omega_{ICE})$ به صورت شکل (۲-۳) است.



شکل (۲-۳) منحنی توان ماکزیمم بر حسب سرعت در موتور احتراقی

(۶) ω_{ICE} نیز سرعت دوران ICE بوده و با توجه به شکل ۲-۳ در بازه‌ی [۸۰۰-۳۹۰۰] دور در

دقیقه تغییر می‌کند.

۲-۱-۳ مدل دینامیکی سیستم انتقال متغیر پیوسته (CVT)

در این تحقیق فرض بر این است که در سطح نظارتی هیچ تاخیری بین توان ورودی و خروجی CVT لحاظ نشده و ارتباط بین توان ورودی و خروجی CVT با ضریب بازدهی $\eta_{cvt} = 0.95$ بیان می‌گردد. که در آن توان ورودی CVT همان $P_{ICE}(t)$ می‌باشد.

$$P_{cvt}(t) = 0.95 P_{cvt,in}(t) \quad (7-1-3)$$

از آنجایی که کاهش واقعی نسب دنده و سرعت خودرو به عواملی مانند توان مورد نیاز موتور، اقتصاد سوخت و قابلیت‌های رانندگی دارد، از اینرو فرمول سرعت ICE را طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌نماییم.

$$\omega_{ICE} \in \left(\frac{60}{2\pi} \right) \cdot k_{v3} V(t) [G_r^{\min}, G_r^{\max}] \quad (8-1-3)$$

نسبت سرعت دوران موتور احتراقی (ω_{ICE}) به سرعت خودرو ($V(t)$) با ضرب دو پارامتر $k_{v3} G_r$ تعیین می‌شود، که در آن:

(۱) k_{v3} نسبت بین میله‌ی محرک و شعاع چرخ‌ها می‌باشد.

(۲) G_r ضریب نسبی دنده‌ی خودرو بوده که مقدار آن در بازه‌ی $G_r \in [G_r^{\min}, G_r^{\max}]$ قرار می‌گیرد. و ما در این تحقیق بازه‌ی تغییرات نسبت دنده‌ی CVT را با معادله‌ی زیر مطرح می‌سازیم.

$$0.407 = G_r^{\min} \leq G_r^{\min}(V) \leq G_r(V, P_{ICE}) \leq G_r^{\max}(V) \leq G_r^{\max} = 2.307 \quad (9-1-3)$$

حال برای محاسبه‌ی سرعت موتور احتراقی ($\omega_{ICE}(V, P_{ICE})$) روابط متوالی زیر را تعریف می‌نماییم.

$$(10-1-3)$$

$$(11-1-3) \omega_{ICE}(V, P_{ICE}) = (1-p) \omega_{ICE}^{\min}(V) + p \omega_{ICE}^{\max}(V)$$

$$(\omega_{ICE}^{\max})^{-1} = \begin{cases} (435.3 \cdot V) \text{eng}(435.3 \cdot V) & V \leq 8.46 \\ -217.7V^2 + 4117 - 15573 & 8.46 < V < 9.46 \\ 3900 & 9.46 \leq V \leq 30 \end{cases}$$

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

$$\omega_{ICE}^{\min}(V) = \begin{cases} G_r^{\max} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V \cdot \text{eng}\left(G_r^{\max} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V\right) & V \leq 1.38 \\ (-217.7V^2 + 1018V - 389.5) \times \text{eng}(\dots) & 1.38 < V < 2.38 \\ 800 & 2.38 \leq V \leq 10.19 \\ 37.43V^2 - 762.6V + 4684 & 10.19 \leq V \leq 11.19 \\ G_r^{\min} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V & 11.19 \leq V \leq 30 \end{cases} \quad (10-1-3)$$

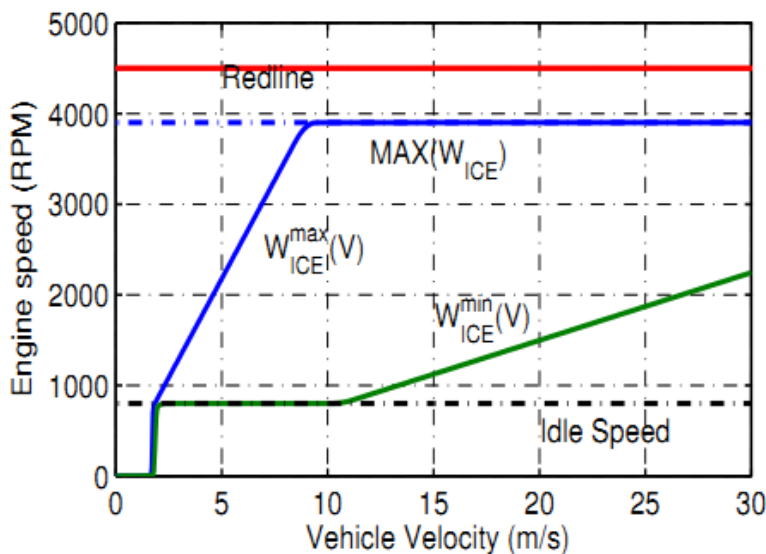
معادلات فوق برای یک خودروی خاص تعریف شده که در شکل (۳-۳) نمودار آن ترسیم شده

است. همانطور که از شکل پیداست، بازه‌ی روشن شدن ICE تا تولید حداکثر سرعت آن بین ۸۰۰ تا

۳۹۰۰ دور در دقیقه بوده که در کمترین سرعت ICE (۸۰۰ دور بر دقیقه) با نسبت دنده‌ی مینیمم

سرعت خودرو ۱/۳۸ متر بر ثانیه و در بیشترین سرعت ICE (۳۹۰۰ دور بر دقیقه) با نسبت دنده‌ی

ماکزیمم سرعت خودرو ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل (۳-۳) منحنی سرعت موتور احتراقی بر حسب سرعت خودرو

۳-۱-۳ مدل سازی دینامیکی موتور/ژنراتور

ما در این زیربخش به بررسی جزئیات مدل سازی ED در سطح نظارتی می پردازیم. به طور خلاصه ارتباط جبری بین توان های ورودی و خروجی ED در سطح نظارتی به شرح زیر می باشد.

$$P_{ED,out}^v(t) = \eta_{ED}^v(\omega_{ED}) P_{ED,in}^v(t) \quad (۱۴-۱-۳)$$

که در آن بازده ED در مد موتوری برابر است با:

$$\eta_{ED}^0(\omega_{ED}) = c_1 - \frac{c_1 c_2}{\omega_{ED} - c_2} \quad (۱۵-۱-۳)$$

و برای بازده ED در مد ژنراتوری نیز داریم:

$$\eta_{ED}^1(\omega_{ED}) = c_3 - \frac{c_3 c_4}{\omega_{ED}} \quad (۱۶-۱-۳)$$

که دو رابطه ی اخیر پارامترهای $c_1, c_3 = 0.90$ و $c_2, c_4 = 6.33$ بوده، و محدودیت مینیمم

سرعت کاری رتور نیز معادل $\omega_{ED} \geq \omega_{ED}^1 = 7 \text{ rad/s}$ می باشد. توان های ورودی به ED در مدهای

کاری نیز مطابق با رابطه ی زیر بدست می آید:

$$P_{ED,in}^v(\omega_{ED}) = \begin{cases} P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}(V)) \cdot u_{EM}(t) & , v=0 \\ P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}(V)) \cdot u_{GEN}(t) & , v=1 \end{cases} \quad (۱۷-۱-۳)$$

در رابطه ی فوق $u_{EM}(t), u_{GEN}(t) \in [0,1]$ کنترل های مدوله شده می باشند. توان ورودی مجاز

ماکزیمم در هر دو مد نیز به شرح زیر است:

$$P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}) = \begin{cases} k_{ED,1}(\bar{\omega}_{ED}) + k_{ED,2} & \bar{\omega}_{ED} \leq \frac{321}{400} \\ k_{ED,3}(\bar{\omega}_{ED})^2 + k_{ED,4}(\bar{\omega}_{ED}) + k_{ED,5} & \frac{321}{400} < \bar{\omega}_{ED} \leq \frac{341}{400} \\ k_{ED,5} & \bar{\omega}_{ED} \geq \frac{341}{400} \end{cases} \quad (۱۸-۱-۳)$$

مقادیر پارامترهای ذکر شده در رابطه (۱۸-۱-۳) نیز در جدول (۱-۳) آمده اند:

جدول (۳-۱) پارامترهای ماکزیمم توان ورودی ED

پارامترها	$k_{ED,1}$	$k_{ED,2}$	$k_{ED,3}$	$k_{ED,4}$	$k_{ED,5}$	$k_{ED,6}$
مقادیر	۴۰/۱	۰/۷۶۴	-۴۰۱	۶۸۳	-۲۵۷	۳۳/۹

در معادلات فوق $\bar{\omega}_{ED}$ سرعت نرمالیزه شده‌ی محور ED بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\bar{\omega}_{ED}(V) = \frac{\lambda_c \cdot k_{v3} \cdot V}{400} \quad (۱۹-۱-۳)$$

مقادیر پارامترهای رابطه‌ی فوق $\lambda_c = 1.525$ و $k_{v3} = 19.26$ می‌باشند. و در نهایت در مد

موتوری $P_{bat} = P_{ED,in}^0 \geq 0$ و در مد ژنراتوری $P_{bat} = P_{ED,out}^1 < 0$ می‌باشند.

۴-۱-۳ مدل سازی دینامیکی باتری

رفتار شارژ و دشارژ باتری و بازده آن را حالت شارژ باتری (SOC) نامیده و به نسبت شارژ ذخیره شده لحظه‌ای به شارژ ذخیره شده‌ی باتری بستگی دارد. معمولاً برای بازده بالا و طول عمر بیشتر باتری عملکرد خودرو باید طوری باشد که محدوده‌ی شارژ باتری بین مقدار نرمالیزه شده‌ی مینیمم ۰/۴ و ماکزیمم ۰/۸ قرارگیرد. معادله‌ی دینامیکی زیر مربوط به یک باتری که تلفات و ضریب شارژ و دشارژ در آن لحاظ شده است، می‌باشد.

$$\dot{W}_{bat} = \frac{d_{3,v}}{W_{bat}^{max}} (P_{bat,nom}^v)^2 - (\ln(d_{1,v} \bar{W}_{bat} + d_{2,v}) + 2d_{3,v} P_{bat,nom}^v + d_{4,v}) P_{bat}(t) \quad (۲۰-۱-۳)$$

$$\bar{W}_{bat} = \frac{W_{bat}(t)}{W_{bat}^{max}} \quad (۱)$$

$$W_{bat}^{max} \text{ حداکثر انرژی قابل شارژ در باتری} \quad (۲)$$

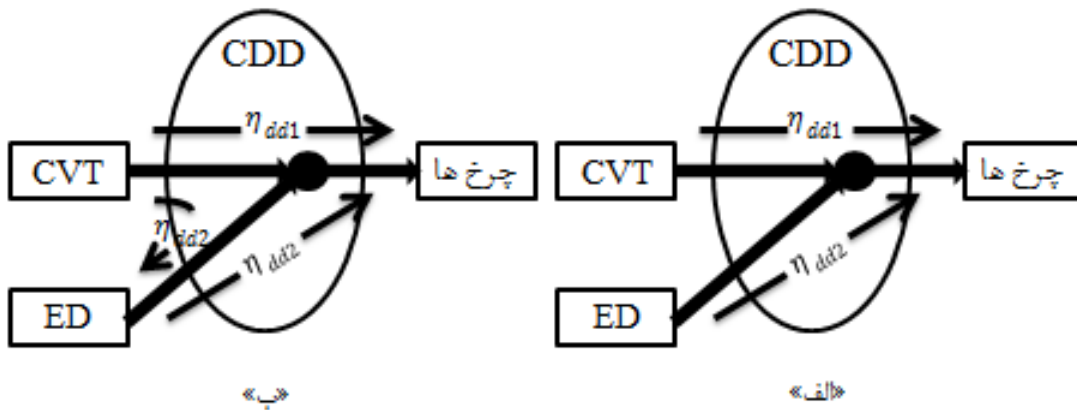
$$P_{bat,nom} \text{ توان نامی باتری} \quad (۳)$$

$$P_{bat}(t) \text{ توان ورودی و خروجی به باتری است که در زیربخش قبل تشریح شد.} \quad (۴)$$

(۵) $\{d_{1,v}, d_{2,v}, d_{3,v}, d_{4,v}\}$ مجموعه پارامترهای باتری بوده که بسته به مد کاری و مدل خاص تغییر می کنند.

۵-۱-۳ مدل سازی دینامیکی اجزای تزویج و دیفرانسیل (CDD)

اجزای تزویج و دیفرانسیل عملیات تزویج توان ICE داده شده به CVT با توان ED و انتقال این توان به چرخ ها را انجام می دهد. انتقال توان ورودی و خروجی در CDD به صورت لحظه ای می باشد. بنابراین مدل مسیر توان ورودی و خروجی به CDD را می توان توسط یک معادله ی جبری از توان های خروجی CVT و ED و استفاده از بازده اجرایی در مدهای عملکردی بیان نمود. شکل (۳-۴) نمودار بازده مسیرهای توان در CDD را نمایش می دهد.



شکل (۳-۴) مسیر توان CDD (الف): در مد زئرا توری، (ب): در مد موتوری

همان طور که از شکل پیداست مسیر توان در CDD برای هر مد کاری متفاوت بوده و ضریب بازدهی نیز با توجه به جهت توان تغییر می کند. بنابراین برای وضوح بیشتر این عملکرد، در بخش دوم همین فصل معادلات مسیر توان CDD را برای هر مد کاری به طور جداگانه توصیف نموده و مقادیر پارامترهای آن را لحاظ خواهیم نمود.

۶-۱-۳ مدل دینامیکی خودرو

معادلات سرعت خودروهای متداول بر اساس عملکرد مسیر توان به فرم زیر بیان می‌گردد:

(۲۱-۱-۳)

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

در معادله‌ی فوق:

(۱) εV ضریب تنظیم

(۲) m_c وزن خودرو

(۳) $\frac{k_{v1}}{m_c} V^2$ کشش آیرودینامیک^۱ نرمالیزه

(۴) $k_{v2} \cos(\alpha(t))$ مقاومت چرخش^۲

(۵) $\alpha(t)$ زاویه‌ی شیب جاده

(۶) $P_{CDD,wh}^v$ توان دریافتی یا تحویلی (با توجه به مد کاری) به اجزای تزویج (CDD)

(۷) و در نهایت P_{fr} توان ترمز اصطکاکی بوده و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$P_{fr} = P_{fr}^{\max}(V) u_{fr}(t) \quad (۲۲-۱-۳)$$

سرعت خودرو نیز درون مجموعه‌ی $V \in [V^{\min}, V^{\max}] \subset R$ قرار می‌گیرد.

۲-۳ مدل‌سازی در مدهای عملکردی HEV

هدف ما در این بخش ارائه‌ی مجموعه‌ای کامل از معادلات توصیف شده در HEV در دو مد

عملکردی موتوری و ژنراتوری برای سطح نظارتی می‌باشد. این مجموعه معادلات با شاخص عملکرد

^۱ Aerodynamic drag

^۲ Rolling resistance

اختصاص داده شده ترکیب شده و یک فرمول کامل از مسئله‌ی مدیریت توان برای سطح نظارتی

HEV ارائه می‌دهند. مدل کلی معادلات حالت دینامیکی غیرخطی HEV به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{ICE} \\ \dot{W}_{bat} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = f_{v(t)}([P_{ICE}, \bar{W}_{bat}(t), V(t)], u_{v(t)}(t)) \quad (1-2-3)$$

که در آن $v=0$ مد موتوری و $v=1$ مد ژنراتوری را نشان می‌دهند. قانون کنترل تطبیق دهنده

در مد موتوری به شرح زیر است:

$$u_0(t) = [eng(\omega_{ICE}(V, P_{ICE}))u_{ICE}(t), u_{fr}(t), u_{EM}(t)] \in [0,1] \times [0,1] \times [0,1] \quad (2-2-3)$$

و در مد ژنراتوری:

$$u_1(t) = [eng(\omega_{ICE}(V, P_{ICE}))u_{ICE}(t), u_{fr}(t), u_{GEN}(t)] \in [0,1] \times [0,1] \times [0,1] \quad (3-2-3)$$

هدف ما در این بخش تعیین معادلات و محدودیت‌های مرتبط با مدل HEV توسعه یافته و

نحوه‌ی عملکرد آن می‌باشد. از این‌رو ابتدا به توصیف معادله‌ی دینامیکی ICE در هر دو مد می‌

پردازیم. سپس معادلات مدل‌سازی مانند معادلات دیفرانسیل SOC و سرعت خودرو را وابسته به مد

کاری مشروط خواهیم نمود.

۱-۲-۳ دینامیک‌های ICE

در حضور تاخیر توان ICE با مقدار $\tau_{ICE} = 0.3s$ ، معادله‌ی دیفرانسیل توان ICE طبق رابط

متوالی ۴ تا ۱۲ به فرم زیر بدست می‌آید:

$$\dot{P}_{ICE}(t) = -\frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}(t) + \frac{1}{\tau_{ICE}} P_{ICE}^{des}(t) \quad (4-2-3)$$

$$P_{ICE}^{des}(t) = P_{ICE}^{des}(\omega_{ICE}(V)).eng(\omega_{ICE}(V)).u_{ICE}(t) \quad (5-2-3)$$

$$P_{ICE}^{max}(\omega_{ICE}) = a_1 \left(\frac{\omega_{ICE}}{\max(\omega_{ICE})} \right)^2 + a_2 \left(\frac{\omega_{ICE}}{\max(\omega_{ICE})} \right) + a_3 \quad (6-2-3)$$

که مقادیر پارامترهای آن $\max(\omega_{ICE}) = 3900$ ، $a_3 = -49.59$ ، $a_2 = 136.9$ ، $a_1 = -14.2$ می باشد.

$$\omega_{ICE}(V, P_{ICE}) = (1-p)\omega_{ICE}^{\min}(V) + p\omega_{ICE}^{\max}(V) \quad (7-2-3)$$

$$\omega_{ICE}^{\max}(V) = \begin{cases} (435.3 * V) \text{eng}(435.3 * V) & V \leq 8.46 \\ -217.7V^2 + 4117 - 15573 & 8.46 < V < 9.46 \\ 3900 & 9.46 \leq V \leq 30 \end{cases} \quad (8-2-3)$$

$$p = \frac{P_{ICE}}{P_{ICE}^{\max}(\omega_{ICE}^{\max}(V))} \quad (9-2-3)$$

$$\omega_{ICE}^{\min}(V) = \begin{cases} G_r^{\max} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V \text{eng}\left(G_r^{\max} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V\right) & V \leq 1.38 \\ (-217.7V^2 + 1018V - 389.5) \times \text{eng}(\dots) & 1.38 < V < 2.38 \\ 800 & 2.38 \leq V \leq 10.19 \\ 37.43V^2 - 762.6V + 4684 & 10.19 \leq V \leq 11.19 \\ G_r^{\min} \frac{60k_{v3}}{2\pi} V & 11.19 \leq V \leq 30 \end{cases} \quad (10-2-3)$$

$$\text{eng}(\omega_{ICE}) = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh\left(\frac{\omega_{ICE} - 750}{10}\right) \right) \quad (11-2-3)$$

$$u_{ICE(t)} = [0, 1] \quad (12-2-3)$$

۲-۲-۳ معادلات مدل سازی در مد موتوری ($v=0$)

ما ابتدا معادله دیفرانسیل انرژی نرمالیزه شده باتری را در مد موتوری تعیین می نماییم:

$$\dot{W}_{bat} = \frac{d_{3,0}}{W_{bat}^{\max}} (P_{bat,nom}^0)^2 - (\ln(d_{1,0} \bar{W}_{bat} + d_{2,0}) + 2d_{3,0} P_{bat,nom}^0 + d_{4,0}) P_{bat}(t) \quad (13-2-3)$$

که پارامترهای معادله ی فوق با توجه به شرایط مختص سیکل رانندگی در جدول (۲-۳) ذکر شده اند.

جدول (۲-۳) مقادیر پارامترهای باتری برای سیکل کاری US06 در مد موتوری

$P_{bat,nom}^0 (US06)$	W_{bat}^{max}	$d_{4,0}$	$d_{3,0}$	$d_{2,0}$	$d_{1,0}$	عنوان پارامتر
5.1 KW	7776 KJ	4.66×10^{-1}	7.57×10^{-3}	1.83	-3.55×10^{-1}	مقدار پارامتر

توان خروجی باتری $P_{bat}(t)$ که در معادله فوق استفاده گردیده برای فراهم نمودن توان مورد نیاز ED و از رابطه‌ی زیر گرفته می‌شود:

$$P_{ED,out}^0(t) = \eta_{ED}^0(\omega_{ED}) P_{ED,in}^0(t) \quad (۱۴-۲-۳)$$

که در آن:

$$\eta_{ED}^0(\omega_{ED}) = c_1 - \frac{c_1 c_2}{\omega_{ED} - c_2} \quad (۱۵-۲-۳)$$

که در رابطه‌ی فوق پارامترهای $c_1 = 0.90$ و $c_2 = 6.33$ فرض می‌شوند. توان ورودی به باتری در مد موتوری نیز مطابق با رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P_{ED,in}^0(t) = P_{ED,in}^{max}(\omega_{ED}(V)) \cdot u_{EM}(t) = P_{bat}(t) \quad (۱۶-۲-۳)$$

که در آن:

$$P_{ED,in}^{max}(\omega_{ED}) = \begin{cases} k_{ED,1}(\bar{\omega}_{ED}) + k_{ED,2} & \bar{\omega}_{ED} \leq \frac{321}{400} \\ k_{ED,3}(\bar{\omega}_{ED})^2 + k_{ED,4}(\bar{\omega}_{ED}) + k_{ED,5} & \frac{321}{400} < \bar{\omega}_{ED} \leq \frac{341}{400} \\ k_{ED,5} & \bar{\omega}_{ED} \geq \frac{341}{400} \end{cases} \quad (۱۷-۲-۳)$$

پارامترهای معادله‌ی فوق در جدول (۱-۳) آمده‌اند، و عبارت $\bar{\omega}_{ED}$ سرعت نرمالیزه شده‌ی محور

ED بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\bar{\omega}_{ED}(V) = \frac{\lambda_c \cdot k_{v3} \cdot V}{400} \quad (۱۸-۲-۳)$$

مقادیر پارامترهای رابطه‌ی فوق $\lambda_c = 1.525$ و $k_{v3} = 19.26$ بوده و بازه‌ی قانون کنترل به

فرم زیر است:

$$u_{ED}(t) \in [0,1] \quad (19-2-3)$$

توان‌های خروجی ED و CVT در CDD ترکیب شده و توان لازم برای راه اندازی چرخ‌ها را فراهم می‌نمایند. بنابراین می‌توان توان خروجی اجزای تزویج که برای رانش چرخ‌های خودرو تولید شده به صورت معادله‌ی دینامیکی زیر توصیف می‌شود:

$$P_{C,wh}^0(t) = P_{C,CVT}(t) + 0.93P_{C,ED}^0(t) \quad (21-2-3)$$

که در رابطه‌ی فوق آن قسمت از توان ورودی CDD که از CVT تامین می‌شود، ضریبی از توان خروجی ICE بوده و از رابطه (22-2-3) بدست می‌آید:

$$P_{C,CVT}(t) = 0.95P_{ICE}(t) \quad (22-2-3)$$

و سهم توان ورودی به CDD حاصل از ED نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{C,ED}^0(t) = P_{ED,out}^0(t) \quad (23-2-3)$$

در ادامه نیز خلاصه‌ای از دینامیک خودرو در مد موتوری را بیان می‌نماییم. معادله‌ی حالت سرعت خودرو در مد موتوری طبق رابطه‌ی زیر توصیف می‌گردد:

$$\dot{V}(t) = - \left(\frac{k_{v1}}{m_c} V^2 + k_{v2} \cos(\alpha(t)) \right) \text{sgn}(V) - g \sin(\alpha(t)) + \frac{1000}{m_c (V + \varepsilon_V)} (P_{C,wh}^0 - P_{fr}(t)) \quad (24-2-3)$$

که پارامترهای معادله در جدول (3-3) آمده است:

جدول (3-3) مقادیر پارامترهای معادله دینامیکی خودرو

پارامترها	k_{v1}	m_c	k_{v2}	g	ε_V
مقادیر	۰/۹۲۸۸	۲۸۵۰ Kg	۰/۱۴۷۲	۹/۸۱	۰/۳

پارامترهای ذکر شده در معادله‌ی دینامیکی سرعت خودرو شامل $\alpha(t)$ شیب جاده و $P_{C,wh}^0$ توان خروجی اجزای تزویج می‌باشند که در معادلات فوق آمده‌اند. به علاوه، در معادله‌ی دینامیکی خودرو یک توان ورودی با عنوان توان ترمز اصطکاکی نیز ذکر شده که با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$P_{fr}(t) = P_{fr}^{\max}(V) \cdot u_{fr}(t) \quad (24-2-3)$$

که در رابطه (24-2-3) توان ترمز اصطکاکی در سرعت ماکزیمم نیز طبق رابطه‌ی زیر برابری می‌نماید:

$$P_{fr}^{\max}(V) = 50 \cdot \tanh\left(\frac{V}{5}\right) \quad (25-2-3)$$

و در نهایت تلاش کنترلی نرمالیزه شده ترمزی را این‌گونه توصیف می‌نماییم:

$$u_{fr}(t) = [0,1] \quad (26-2-3)$$

در مجموعه معادلات فوق با ترکیب دینامیک ICE خلاصه‌ی کاملی از مدل مسیر توان نظارتی HEV برای مد موتوری فراهم می‌گردد.

۳-۲-۳ معادلات مدل‌سازی در مد ژنراتوری ($v=1$)

ما ابتدا معادله دیفرانسیل انرژی نرمالیزه شده باتری را درمد ژنراتوری تعیین می‌نماییم:

$$\dot{W}_{bat} = \frac{d_{3,1}}{W_{bat}^{\max}} (P_{bat,nom}^1)^2 - (\ln(d_{1,1} \bar{W}_{bat} + d_{2,1}) + 2d_{3,1} P_{bat,nom}^1 + d_{4,1}) P_{bat}(t) \quad (27-2-3)$$

که پارامترهای معادله‌ی فوق با توجه به شرایط مختص سیکل رانندگی در جدول زیر ذکر شده‌اند.

جدول (۳-۴) مقادیر پارامترهای باتری برای سیکل کاری US06 در مد ژنراتوری

عنوان پارامتر	$d_{1,1}$	$d_{2,1}$	$d_{3,1}$	$d_{4,1}$	W_{bat}^{\max}	$P_{bat,nom}^1$ (US06)
مقدار پارامتر	-9.99×10^{-2}	6.22×10^{-1}	8.95×10^{-3}	1.53	-7776 KJ	-7.1 KW

در مد ژنراتوری توان خروجی ED توان ورودی باتری می‌باشد، به این معنی که:

$$P_{bat}(t) = -P_{ED,out}^1(t) \quad (28-2-3)$$

توان خروجی ED از رابطه‌ی زیر گرفته می‌شود:

$$P_{ED,out}^1(t) = \eta_{ED}^1(\omega_{ED}) P_{ED,in}^1(t) \quad (29-2-3)$$

و بازده آن:

$$\eta_{ED}^1(\omega_{ED}) = c_3 - \frac{c_3 c_4}{\omega_{ED}} \quad (30-2-3)$$

که در رابطه‌ی فوق پارامترهای $c_3 = 0.90$ و $c_4 = 6.3$ فرض می‌شوند. در مد ژنراتوری

سرعت رتور با محدودیت همراه بوده و به فرم زیر است:

$$\omega_{ED} = \omega_{ED,min}^1 = 7 \text{ rad / s} \quad (31-2-3)$$

و توان ورودی ED نیز برابر است با:

$$P_{ED,in}^1(t) = P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED}(V)) u_{GEN}(t) \quad (32-2-3)$$

و $P_{ED,in}^{\max}(\omega_{ED})$ و $\bar{\omega}_{ED}(V)$ استفاده شده در فوق در توضیحات مد موتوری روابط (3-2-17) و

(3-2-18) آمده‌اند، بنابراین از دوباره نویسی آن‌ها می‌پرهیزیم. ورودی کنترل ED در مد ژنراتوری نیز

به فرم زیر می‌باشد:

$$u_{GEN}(t) \in [0,1] \quad (33-2-3)$$

توان ورودی ED در این مد عملکردی از توان خروجی شفت واسط بین ED و CDD تامین

می‌گردد.

$$P_{ED,in}^1(t) = P_{C,ED}^1(t) \quad (34-2-3)$$

که در آن فرمول توزیع توان‌های ورودی و خروجی CDD به شرح زیر است:

$$0.93P_{C,wh}^1(t) + P_{C,ED}^1(t) = 0.93P_{C,cvt}^1(t) \quad (35-2-3)$$

در رابطه‌ی فوق $P_{C,cvt}(t)$ سهم توان موتور احتراقی بوده که همانند مد موتوری می‌باشد.

$$P_{C,cvt}(t) = 0.95P_{ICE}(t) \quad (36-2-3)$$

$P_{C,wh}^1(t)$ نیز توان محور واسط بین CDD و چرخ‌ها می‌باشد، که بسته به دریافت توان و یا بازگشت توان ترمزی از مثبت به منفی تغییر علامت می‌دهد. در ادامه نیز خلاصه‌ای از دینامیک خودرو در مد ژنراتوری را بیان می‌نماییم. معادله‌ی حالت سرعت خودرو در مد ژنراتوری طبق رابطه‌ی زیر توصیف می‌گردد:

$$\dot{V}(t) = - \left(\frac{k_{v1}}{m_c} V^2 + k_{v2} \cos(\alpha(t)) \right) \text{sgn}(V) - g \sin(\alpha(t)) + \frac{1000}{m_c (V + \varepsilon_V)} (P_{C,wh}^1 - P_{fr}(t)) \quad (37-2-3)$$

پارمترهای معادله فوق در زیربخش مربوط به مد موتوری به طور کامل تشریح شدند، بنابراین در این قسمت از تکرار آن‌ها اجتناب می‌نماییم. پارمترهای معادله‌ی (37-2-3) نیز در جدول (3-3) آمده‌اند. در مجموعه معادلات فوق با ترکیب دینامیک ICE خلاصه‌ی کاملی از مدل مسیر توان نظارتی HEV برای مد ژنراتوری فراهم می‌گردد.

۳-۳ بازده ICE

وظیفه‌ی زیرسیستم ICE تبدیل انرژی سوخت فسیلی به توان مکانیکی $P_{ICE}(t)$ در طی فرآیند احتراق می‌باشد، که توان مکانیکی تولید شده برای رانش خودرو و شارژ باتری استفاده می‌گردد. از آن‌جا که فرآیند احتراق غیر قابل برگشت می‌باشد، مقدار سوخت مصرفی در انتهای مشخصات رانندگی یک معیار مهم برای ارزیابی استراتژی کنترلی در HEV می‌باشد. در واقع اغلباً برای کنترل HEV مصرف سوخت به عنوان بخشی از شاخص عملکرد استفاده می‌گردد [۱۳ و ۲۷]. مقدار سوخت مصرفی در فرآیند احتراق را می‌توانیم توسط η_{ICE} که ضریبی از توان تولیدی ICE

می‌باشد، نشان دهیم. از این‌رو ICE در طی فرآیند احتراق برای تولید توان مکانیکی $P_{ICE}(t)$ به مقدار سوخت معادلی مطابق رابطه‌ی زیر دارد.

$$P_{fuel} = P_{fuel}(\dot{m}_f(t)) = \frac{P_{ICE}}{\eta_{ICE}} \quad (1-3-3)$$

که در آن $\dot{m}_f(t)$ نرخ سوخت مصرفی در ICE می‌باشد. و به منظور مینیمم‌سازی مصرف

سوخت در طی عملیات بهینه‌سازی، می‌توان ترم جریمه‌ی $P_{fuel} = \frac{P_{ICE}}{\eta_{ICE}}$ را در شاخص عملکرد لحاظ

نمود. آنچه که از فرضیات این تحقیق می‌باشد، فرمول محاسبه‌ی بازده تبدیل انرژی سوخت $P_{fuel}(\dot{m}_f(t))$ به توان مکانیکی $P_{ICE}(t)$ توسط تقریب زیر می‌باشد.

$$\eta_{ICE} \approx \frac{P_{ICE}}{P_{fuel}} = \eta_{ICE}(P_{ICE}, \omega_{ICE}) \quad (2-3-3)$$

رابطه‌ی فوق بیان می‌کند که بازده سوخت تابعی از توان تولیدی $P_{ICE}(t)$ و سرعت دوران

$\omega_{ICE}(t)$ موتور احتراقی می‌باشد. حال می‌توان توسط یک چند جمله‌ای که از داده‌های واقعی گشتاور

منطبق بر بازده سوخت به دست آمده است، برای تقریب $\eta_{ICE}(P_{ICE}, \omega_{ICE})$ استفاده نماییم [۱۲].

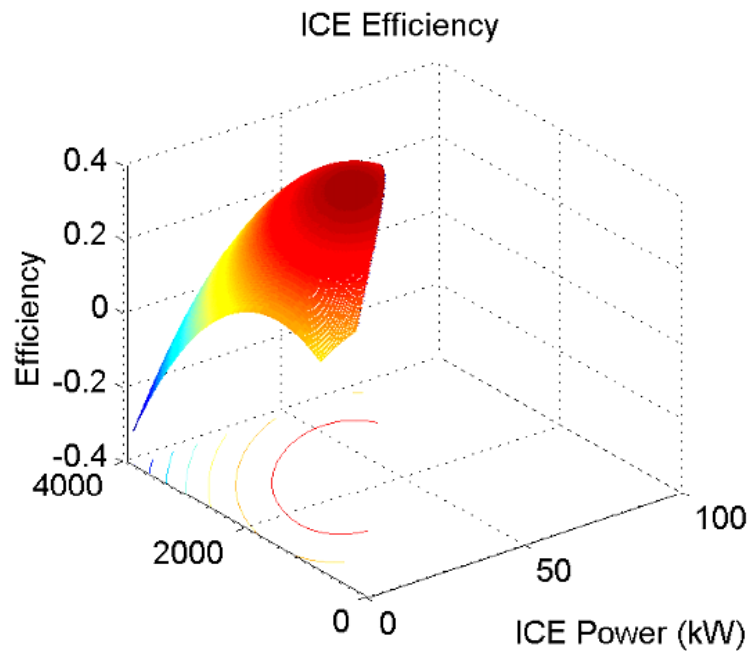
$$\begin{aligned} \eta_{ICE}(P_{ICE}, \omega_{ICE}) = & n_1 \left(\frac{P_{ICE}}{\max(P_{ICE})} \right)^2 + n_2 \left(\frac{\omega_{ICE}(V, P_{ICE})}{\max(\omega_{ICE})} \right)^2 + \\ & n_3 \left(\frac{P_{ICE}}{\max(P_{ICE})} \right) + n_4 \left(\frac{\omega_{ICE}(V, P_{ICE})}{\max(\omega_{ICE})} \right) + \\ & n_5 \left(\frac{P_{ICE}}{\max(P_{ICE})} \right) \left(\frac{\omega_{ICE}(V, P_{ICE})}{\max(\omega_{ICE})} \right) + n_6 \end{aligned} \quad (3-3-3)$$

ضرایب موجود در رابطه‌ی فوق به شرح جدول ۳-۶ می‌باشد.

جدول (۳-۵) ضرایب بازده ICE

$\max(\omega_{ICE})$	$\max(P_{ICE})$	n_6	n_5	n_4	n_3	n_2	n_1	پارمترها
3900 RPM	73.13 kW	$1.95 \cdot 10^{-2}$	-0.29	0.65	0.61	-0.56	-0.24	مقادیر

رابطه‌ی بین بازده، توان و سرعت ICE در شکل (۳-۵) رسم شده و نقاط بازده ماکزیمم با رنگ تیره‌تر نشان داده شده است.



شکل (۳-۵) تقریب بازده ICE در توان و سرعت مجاز [۱۲]

همان‌طور که از شکل پیداست ماکزیمم بازده بدست‌آمده ۳۸/۴٪ بوده، که دستیابی به این بازده در سرعت ۲۳۶۰ دور بر دقیقه و توان ۳۹ کیلوواتی امکان‌پذیر می‌باشد.

فصل چهارم:

اعمال تئوری کنترل پهنه‌ی پیرید در سطح نظارتی

اعمال تئوری کنترل بهینه‌ی هیبرید در سطح نظارتی

در این فصل، براساس مطالب گفته شده در مورد کنترل مسیر توان نظارتی به فرموله کردن مسئله مدیریت توان با اعمال مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی هیبرید (HOCP) می‌پردازیم. فرموله کردن HOCP برای HEV نیازمند مجموعه معادلات مدل‌سازی همراه با ورودی‌های کنترل گفته شده در فصل سوم و شاخص عملکرد بهینه‌ساز که در این فصل آن را تعریف می‌نماییم، می‌باشد.

۱-۴ توصیف شاخص عملکرد برای مسئله‌ی مدیریت توان HEV

برای ترکیب رفتارهای درخواستی در عملکرد HEV از یک تابع هدف محدب به شکل زیر

استفاده می‌نماییم:

$$\min_{u \in \Omega, v \in \{0,1\}} J(x_0, t) = \min_{u \in \Omega, v \in \{0,1\}} \left(C_{bat, final} (\bar{W}_{bat}(t_f) - 0.6)^2 + \int_{t_0}^{t_f} L_v(t, x, u) dt \right) \quad (1-4)$$

که در آن:

(۱) کنترل پیوسته‌ی تکه‌ای به شرح زیر می‌باشد:

$$u(t) = \begin{cases} u_0(t), & v = 0 \\ u_1(t), & v = 1 \end{cases} \quad (2-4)$$

و همان‌طوری که در فصل سوم گفته شد، وظیفه‌ی تابع فوق فشرده کردن مقادیر در

مجموعه‌ی محدب Ω می‌باشد.

(۲) در تابع هدف $v(t) = 0, 1$ نشانگر مد عکسکردی موتوری و ژنراتوری می‌باشد.

(۳) ترم $C_{bat,final} (\bar{W}_{bat}(t_f) - 0.6)^2$ در تابع هدف موجب اجبار در بازگشت انرژی باتری به مقدار نامی خود یا همان مقدار نرمالیزه شده 0.6 در لحظه‌ی نهایی می‌گردد. این استراتژی با توجه به عملکرد نگهداری شارژ که در مقالات [۶۰ و ۲۵] آمده، گرفته شده است.

(۴) تابع سوئیچ شونده‌ی زیر انتگرال شاخص عملکرد نیز به شرح زیر می‌باشد:

(۳-۴)

$$L_v(t, x, u) = \begin{cases} L_0(t, x, u_0), & v = 0 \\ L_1(t, x, u_1), & v = 1 \end{cases}$$

که L_0 ترم جریمه در مد موتوری و L_1 در مد ژنراتوری می‌باشند. با توجه به مقالات ارائه شده می‌توان تابع زیر انتگرال $L_v(t, x, u)$ از روی احتمالات گوناگون انتخاب نمود. به عنوان مثال می‌توان تابع هزینه‌ای معرفی نمود که در آن تنها مصرف سوخت [۶۱ و ۲۷] و یا ترکیبی از مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ی [۳۴ و ۱۴، ۱۳] را مینیمم سازد. جنبه‌های تحقیقاتی ما، انتخاب شاخص عملکرد مناسب 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_0 و L_1 جریمه‌ی ردگیری سرعت و توان‌های مصرفی و تلفاتی زیرسیستم‌ها در هر دو مد کاری لحاظ گردد. بنابراین داریم:

$$L_0 = C_V^0 (V(t) - V^{des}(t))^2 + C_{ICE}^0 (P_{fuel})^2 + C_{cvt}^0 (P_{cvt,loss})^2 + C_{CDD}^0 (P_{C,loss}^0)^2 + C_{ED}^0 (P_{ED,loss}^0)^2 + C_{bat}^0 (P_{bat,loss}^0)^2 + C_{fr}^0 (P_{fr})^2 \quad (۴-۴)$$

معادله‌ی فوق در مد موتوری تعریف شده و همکار متقارن آن در مد ژنراتوری به شرح زیر

است:

$$L_1 = C_V^1 (V(t) - V^{des}(t))^2 + C_{ICE}^1 (P_{fuel})^2 + C_{cvt}^1 (P_{cvt,loss})^2 + C_{CDD}^1 (P_{C,loss}^1)^2 + C_{ED}^1 (P_{ED,loss}^1)^2 + C_{bat}^1 (P_{bat,loss}^1)^2 + C_{fr}^1 (P_{fr})^2 \quad (۵-۴)$$

در معادلات فوق توصیف فیزیکی در هر دو حالت L_v به ازای $v = \{0, 1\}$ به شرح زیر است:

(۱) 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. مشخصات استفاده شده بعنوان سرعت درخواستی در این پاینامه سیکل استاندارد آمریکایی US06 در حالت شیب‌دار و بدون شیب جاده می‌باشد.

(۲) 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.

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

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

(۵) در عبارت $C_{ED}^v (P_{ED,loss}^v)^2$ پارامتر $P_{ED,loss}^v$ توان تلفاتی ED بوده و جریمه‌ی تلفات ED را نشان می‌دهد.

(۶) 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.

(۷) 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.

(۸) تمامی ضرایب استفاده شده در معادله فوق غیر منفی می‌باشند $C_V^v, \dots, C_{fr}^v \geq 0$.

ترم‌های بیان شده در عبارات ۱ تا ۷ براساس مدل‌سازی فصل و قبل توسط حالت‌ها و ورودی‌های

کنترل یا ورودی و خروجی زیرسیستم‌ها در مد موتوری و ژنراتوری در جدول زیر تعیین می‌شوند.

جدول (۴-۱) توصیف پارمترهای استفاده شده در ترم‌های جریمه

$P_{fuel} = \frac{P_{ICE}(t)}{\eta_{ICE}(P_{ICE}, V)}$	$P_{cvt,loss} = (P_{cvt,in} - P_{cvt})$	$P_{C,loss}^v = (P_{cvt} - P_{C,ED}^v - P_{C,wh}^v)$
$P_{ED,loss}^0 = (P_{ED,in}^0 - P_{ED,out}^0)$	$P_{bat,loss}^0 = P_{bat}^0 \left(\frac{1}{\eta_{bat}^0} - 1 \right)$ $P_{bat,loss}^1 = P_{bat}^1 (\eta_{bat}^1 - 1)$	$P_{fr} = P_{fr}^{\max}(V) u_{fr}(t)$

حال با ترکیب مدل نظارتی HEV با شاخص عملکرد، مسئله‌ی مدیریت توان را به‌طور ریاضی فرموله می‌کنند. جزئیات آنرا در بخش بعدی بیان خواهیم کرد.

۲-۴ تابع هزینه‌ی نهایی برای حل مسئله‌ی مدیریت توان در HEV

همان‌طوری که می‌دانیم متغیر کنترلی گسسته (مد عملکردی خودرو) در بازه‌ی $v(t) = [0, 1]$ تغییر می‌کند. جایگذاری این دینامیک گسسته در شاخص عملکرد رابطه‌ی نهایی را به فرم زیر درمی‌آورد. دستور مسئله‌ی مینیم‌سازی پیدا کردن مقادیر u_0^* ، u_1^* و v^* جواب‌های تابع هدف می‌باشند.

$$\min_{u_0, u_1 \in \Omega, v \in [0, 1]} J(x_0, t) = \min_{u_0, u_1 \in \Omega, v \in [0, 1]} \left(C_{bat, final} (\bar{W}_{bat}(t_f) - 0.6)^2 + \int_{t_0}^{t_f} L_E(t, x, u_0, u_1, v) dt \right) \quad (۶-۴)$$

که در آن تابع زیر انتگرال در حالت جایگزین از رابطه‌ی زیر گرفته می‌شود:

$$L_E(t, x, u_0, u_1, v) = (1 - v(t)) L_0(t, x, u_0) + v(t) L_1(t, x, u_1) \quad (۷-۴)$$

معادلات مربوط به L_0 و L_1 در بخش قبلی تشریح شدند، و نتیجه‌ی اعمال این جایگذاری در

مجموعه معادلات دینامیکی مسیر توان نظارتی HEV به شرح زیر می‌باشد.

$$\dot{x} = f_E(t, x, u_0, u_1, v) = (1 - v(t)) f_0(x(t), u_0(t)) + v(t) f_1(x(t), u_1(t)) \quad (۸-۴)$$

در رابطه (۸-۴) f_0 و f_1 معادلات حالت دینامیکی در مد موتوری و ژنراتوری بوده که در

فصل سوم به تشریح آن‌ها پرداختیم.

فصل پنجم:

کنترل پیش بین مدل غیر خطی

کنترل پیش بین مدل غیر خطی

کنترل کننده‌های پیش بین مدل (MPC)^۱ اخیراً در سیستم‌های کنترلی گوناگونی به کار می‌روند. این در حالی است که حجم فوق العاده بالای محاسبات مورد نیاز، باعث کندی آن‌ها شده و در نهایت استفاده از این نوع کنترل فقط در سیستم‌های کند قابل اجرا می‌باشد.

۱-۵ مقدمه

اولین کنترل کننده‌های MPC در دهه‌ی هفتاد میلادی در صنعت به کار گرفته شد، اما منجر به معرفی به عنوان مبدع اولیه نگردید. اما به هر حال این کنترل کننده نخستین بار توسط ریچالت و همکارانش مطرح شد [۲۸]. همان طوری که می‌دانیم بهینه‌سازی تابع هدف مهمترین وظیفه‌ی MPC می‌باشد که زمان گیرترین بخش کنترل کننده می‌باشد. در اکثر مقالاتی که تاکنون برای افزایش سرعت این کنترل کننده‌ها منتشر شده، می‌توان به مراجع [۲۹ و ۳۰] اشاره نمود، که در آن‌ها با ساده‌سازی‌های ریاضی، محاسبات مربوط به حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی مربعی تا حدی کاهش یافته است.

کنترل پیش بین مدل با دو مفهوم افق دید^۲ و افق کنترل^۳ شناخته می‌شود، که در حال حاضر به عنوان یک کنترل کننده‌ی خوب جایگاه خود را تثبیت نموده است. به ویژه این که MPC خطی برای پیش بینی و کنترل سیستم‌های خطی با محدودیت‌های خطی به طور گسترده‌ای در صنعت به کار می‌رود. به طور عمده از این روش برای کنترل سیستم‌های چند متغیره و محدودیت‌های حالت و ورودی

^۱ Model Predictive Control(MPC)

^۲ Horizon predictive

^۳ Horizon control

سیستمی آن استفاده می‌شود [۳۱]. با توجه به رشد موفقیت آمیز MPC خطی در طول دهه‌ی اخیر، کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی (NMPC)^۱ دست‌آوردی مهم در این زمینه می‌باشد. در سال‌های اخیر استراتژی‌های NMPC گوناگونی برای پایداری سیستم حلقه بسته توسعه یافت و با مطرح کردن مسائل کلیدی به مطالعه و حل مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه‌باز پرداخته شد [۳۲-۳۴].

ما در این پایان‌نامه علاقه‌مند به بررسی پایداری و فیدبک حالت NMPC زمان پیوسته همراه با اطلاعات اندازه‌گیری نمونه‌برداری شده می‌باشیم. به این معنی که با مطرح نمودن پایداری سیستم-های پیوسته در زمان توسط مسیرهای ورودی اعمال شده به تعیین جواب مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه‌باز در لحظه‌های نمونه‌برداری شده‌ی گسسته می‌پردازیم. و در نهایت با ارائه‌ی مدل پیوسته‌ی غیرخطی PHEV، روش کنترلی ارائه شده را برای آن تحقق می‌بخشیم.

۲-۵ قاعده‌ی کلی کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی (NMPC)

به‌طور کلی مسئله‌ی NMPC همانند حل یک مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه باز با افق محدود^۲ برخط^۳ که تابع دینامیک‌های سیستم و محدودیت‌های حالت‌ها و کنترل‌ها می‌باشد، فرموله می‌شود. شکل زیر قاعده کلی پایه‌ی MPC را نشان می‌دهد.

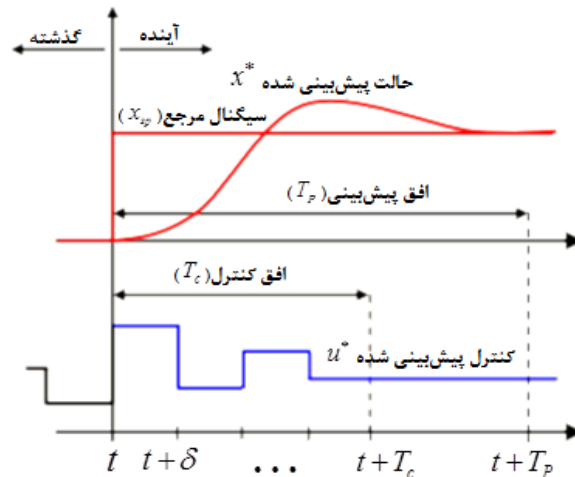
براساس اندازه‌گیری‌های بدست آمده در t ، کنترل‌کننده رفتار دینامیکی سیستم را در طول افق پیش‌بینی T_p پیش‌بینی کرده و ورودی را برای تابع هدف بهینه شده‌ی حلقه باز تعیین می‌نماید. اگر اغتشاش و عدم قطعیت در مدل فرایند نباشد و مسئله‌ی بهینه‌سازی برای افق نامحدود قابل حل باشد، آنگاه اعمال تابع ورودی سیستم که در $t=0$ بدست آمده برای همه‌ی زمان‌های $t \geq 0$ امکان-

¹ Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

² Finite horizon

³ Online

پذیر می‌باشد. به دلیل این که اغتشاشات و عدم قطعیت مدل فرآیند بین رفتار سیستم و رفتار پیش-بینی شده اختلاف بوجود می‌آورد، این امکان برای عموم سیستم‌ها وجود ندارد.



شکل (۵-۱) قاعده‌ی کلی مدل کنترل پیش‌بین

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 اغلباً 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.

۳-۵ فیدبک حالت NMPC

معادلات مربوط به یک سیستم غیرخطی تغییرناپذیر با زمان به شرح زیر می‌باشد.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad x(0) = x_0 \quad (۱-۵)$$

به طوری که محدودیت‌های ورودی و حالت نیز این‌گونه باشند:

$$u(t) \in U, x(t) \in X, \forall t \geq 0 \quad (2-5)$$

که در آن $u(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ و $x(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بردار ورودی و حالت می‌باشند. مجموعه مقادیر ممکن ورودی با U و حالت با X نماد گذاری شده‌اند. بنابراین فرض می‌کنیم مجموعه‌های تعریف شده U و X برای فرضیات زیرین مناسب می‌باشند.

فرض (۱) $U \subseteq \mathbb{R}^m$ مجموعه‌ی فشرده، $X \subseteq \mathbb{R}^n$ مجموعه‌ی متصل و $(0,0) \in X \times U$ می‌باشند.

به سادگی می‌توان از X و U بازه‌ی تغییرات را به صورت زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} U &:= \{u \in \mathbb{R}^m \mid u_{\min} \leq u \leq u_{\max}\} \\ X &:= \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max}\} \end{aligned} \quad (3-5)$$

که در آن u_{\min}, u_{\max} و x_{\min}, x_{\max} بردارهایی ثابت هستند.

فرض (۲) میدان برداری $f = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ پیوسته و شرایط اولیه‌ی مناسب

نیز $f(0,0) = 0$ فرض می‌شوند. به‌علاوه این‌که در X پیوسته‌ی محلی لیب‌شیتز^۱ می‌باشد.

فرض (۳) سیستم (۱-۵) برای هر شرایط اولیه در ناحیه‌ی همگرایی و هر پیوستگی تکه‌ای

دارای یک جواب پیوسته‌ی تکین بوده و تابع ورودی پیوسته‌ی شایسته می‌باشد $u(0): [0, T_p] \rightarrow U$.

روش NMPC در هر لحظه‌ی نمونه‌برداری گسسته‌ی t_i مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه‌باز را با توجه به اطلاعات حالت جاری $x(t_i)$ حل می‌نماید. لحظه‌ی نمونه‌برداری t_i یک قسمت از محور زمان π می‌باشد.

تعریف ۱: (تکه^۲) در هر سری از $\pi = x(t_i), i \in N$ که عددی حقیقی مثبت محدود می‌-

باشد، که در آن $t_0 = 0$ و $t_i < t_{i+1}$ بوده در حالی که به ازای $i \rightarrow \infty$ زمان $t_i \rightarrow \infty$ می‌باشد. اگر t و t_i در یک زمان رخ دهند، t_i باید از نزدیکترین نمونه‌ی قبلی همان لحظه گرفته شده و $t_i < t$ باشد.

¹ Lipschitz

² Partition

به این ترتیب با استفاده از پیش‌بینی آینده کنترل‌کننده سیستم واقعی و مدل سیستم مشخص می‌شوند. معمولاً فرمول ریاضی مسئله‌ی کنترل بهینه با کران محدود که در فوق بیان شد به شرح زیر می‌باشد:

مسئله‌ی (۱) مینیمم سازی تابع هدف زیر:

$$\min_{u^*(0)} J(u^*(0), x(t_i)) \quad (۴-۵)$$

به طوری که:

$$\dot{x}^*(\tau) = f(x^*(\tau), u^*(\tau)) \quad x^*(t_i) = x(t_i) \quad (۵-۵)$$

$$x^*(\tau) \in X, \quad u^*(\tau) \in U \quad \tau \in [t_i, t_i + T_p] \quad (۶-۵)$$

$$x^*(t_i + T_p) \in \Omega \quad (۷-۵)$$

در این بررسی متغیرهای داخلی کنترل‌کننده را با علامت ستاره نشان می‌دهیم (برای مثال $x^*(0), u^*$). یعنی $x^*(0)$ جواب معادله‌ی (۵-۵) بوده که توسط ورودی $u^*(0)$ و شرایط اولیه‌ی $x(t_i)$ روی بازه‌ی $[t_i, t_i + T_p]$ رانده می‌شود. تابع هزینه‌ی J نیز در انتهای افق کنترل که عددی در بازه‌ی افق دید $0 < \pi^* \leq T_p$ می‌باشد، توسط رابطه‌ی زیر مینیمم خواهد شد.

$$J(u^*(0); x(t_i)) = \int_{t_i}^{t_i + T_p} F(x^*(\tau), u(\tau)) d\tau + E(x^*(t_i + T_p)) \quad (۸-۵)$$

اگر ترم جریمه‌ی نهایی E و ناحیه‌ی نهایی Ω به درستی انتخاب شوند، می‌توان پایداری حلقه بسته را تضمین نمود [۳۴ و ۳۵]. در اثبات نتایج پایداری نیازمند افزودن موارد زیر در مراحل تابع می‌باشیم.

فرض (۳) همه‌ی آرگومان‌های گام هزینه تابع $F: \mathcal{R}^n \times U \rightarrow \mathcal{R}$ پیوسته، شرایط اولیه‌ی

مناسب $F(0,0) = 0$ و کران پایین تابع کلاس k^1 و $\alpha_F: \alpha_F(\|x\|) \leq F(x,u) \forall (x,u) \in X, U$ بوده که در آن $\|0\|$ نشانگر نرم بردار اقلیدسی می‌باشد، فرض می‌شوند.

^۱ تابع پیوسته‌ی $\alpha: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ را تابع کلاس k می‌باشد اگر و فقط اگر اکیداً صعودی و $\alpha(0) = 0$ باشد.

در روابط زیرین جواب مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی رابطه‌ی (۶-۵) را با $\bar{u}^*(0; x(t_i))$ نمایش می‌دهیم، که ورودی حلقه‌باز تعریف شده‌ای است که تا لحظه‌ی نمونه‌برداری بعدی به سیستم اعمال می‌شود.

$$u(t; x(t_i)) = \bar{u}^*(t; x(t_i)) \quad t \in [t_i, t_{i+1}] \quad (۹-۵)$$

قانون کنترل $u(t; x(t_i))$ یک ورودی فیدبکی بوده و در هر لحظه‌ی نمونه‌برداری با استفاده از اندازه‌گیری جدید حالت مجدداً محاسبه می‌گردد.

تذکره (۱) ایده‌ی اصلی کنترل پیش‌بین فیدبکی در حل مسئله‌ی کنترل بهینه برای حالت‌های جاری برخط می‌باشد. از این رو می‌توان گفت که عبارت $\bar{u}(t; x(t_i))$ غیرصریح می‌باشد.

توجه داشته باشید که این نامعادله‌ی نسبتاً سخت به کار رفته برای یافتن یک راه‌حل اساسی برای ژاکوبین بلمن هامیلتونی^۱ معادله‌ی دیفرانسیل جزئی^۲ می‌باشد، که تنها در این حالت مطرح می‌شود. به طور معمول در نتیجه‌ی حل مسئله بهینه‌سازی دینامیکی با استفاده از روش مستقیم نامبرده، این روش قسم بزرگی از تحقیقات را به خود جذب نموده است [۳۶-۴۲]. در حال حاضر از ویژگی‌های اثبات شده‌ی روش برخط در مسائل واقعی قدرت محاسباتی بالای آن می‌باشد.

جواب رابطه (۵-۵) با شروع از حالت $x(t_1)$ و اعمال ورودی کنترل $u: [t_1, t_2] \rightarrow \mathbb{R}^m$ با $x(\tau; u(0), x(t_1))$ که در آن $\tau \in [t_1, t_2]$ می‌باشد، به دست می‌آید. برای روشن ساختن موضوع به تعریف ورودی مجاز^۳ برای سیگنال‌های ورودی پیوسته‌ی تکه‌ای می‌پردازیم.

تعریف ۲: (ورودی مجاز) ورودی $u: [0, T_p] \rightarrow \mathbb{R}^m$ برای حالت x_0 مجاز است اگر و فقط اگر:

$$(۱) \quad \text{پیوسته‌ی تکه‌ای باشد.}$$

$$(۲) \quad u(\tau) \in U, \forall \tau \in [0, T_p]$$

$$(۳) \quad x(\tau; u(0), x_0) \in X, \forall \tau \in [0, T_p]$$

^۱ Hamilton Jacobi Bellman

^۲ Partial Differential Equations(PDE)

^۳ Admissible Input

$$x(T_p; u(0), x_0) \in \Omega \quad (4)$$

تعریف ۳: (مقدار تابع) مقدار مینیمم تابع هزینه برای حالت x را با تابع مقدار $V(x)$ زیر

نمایش می‌دهیم:

$$V(x) = J(\bar{u}^*(0; x); x) \quad (2-5)$$

مقالات بسیاری با ارائه‌ی روش‌های مختلف تضمین پایداری NMPC را بررسی نموده‌اند، آن-

چه در این روش‌ها متفاوت است، ترم جریمه‌ی نهایی E و ناحیه‌ی همگرایی نهایی Ω می‌باشد [۴۳]-

[۴۹].

ما در این تحقیق فرض کنترل صریح را نمی‌پذیریم ولی در عوض پایداری را تحت فرضیه‌ی

شدنی بودن^۱ ابتدایی مسئله‌ی کنترل بهینه استخراج می‌نماییم، و این همان چیزی است که در

NMPC رخ خواهد داد.

۴-۵ پایداری NMPC با فیدبک حالت

برای ایجاد شرایط همگرایی حالت‌های حلقه بسته به مبداء نیازمند ارائه‌ی قضایای زیر می-

باشیم. نتایج نشان داده شده حاصل تغییر کوچکی در مراجع [۴۶ و ۵۰] می‌باشد.

قضیه‌ی (۱) پایداری NMPC: فرض کنید:

(۱) ناحیه‌ی همگرایی نهایی $\Omega \subseteq X$ توسط $0 \in \Omega$ و ترم جریمه‌ی نهایی $E(x) \in C^1$ که مثبت

نیمه معین می‌باشد، محصور می‌شود.

(۲) $\forall x \in \Omega$ یک ورودی مجاز u_Ω وجود دارد: که همچنین $x(\tau) \in \Omega$ و عبارت زیر برقرار است.

$$\frac{\partial E}{\partial x} f(x(\tau), u_\Omega(\tau)) + F(x(\tau), u_\Omega(\tau)) \leq 0 \quad \forall \tau \in [0, \bar{\tau}] \quad (11-5)$$

(۳) مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی حلقه‌باز NMPC برای $t = 0$ مجاز می‌باشد.

¹ Feasibility

بنابراین برای سیستم حلقه بسته‌ی روابط (۵-۵) و (۵-۸) حالت $x(t)$ به ازای $t \rightarrow \infty$ به مبداء همگرا شده و ناحیه‌ی جذب \mathcal{R} شامل حالت‌ها و ورودی مجاز مذکور می‌باشد.

اثبات) به طور معمول اثبات کنترل پیش‌بین شامل دو قسمت می‌باشد، در قسمت اول شدنی بودن اولیه و بعد از آن را ایجاد نموده، سپس بر همین اساس نتایج همگرایی حالت به مبداء را نشان خواهیم داد.

تعریف شدنی بودن: هر لحظه نمونه‌برداری t_i که حداقل یک راه‌حل برای آن وجود دارد را در نظر بگیرید (مثلاً t_0). بنابراین در بین t_i و t_{i+1} ورودی بهینه‌ی $\bar{u}^*(\tau; x(t_i))$ محاسبه می‌شود. از آنجایی که در مدل فرآیند هیچ عدم تطابق و اغتشاشی وجود ندارد آنگاه داریم:

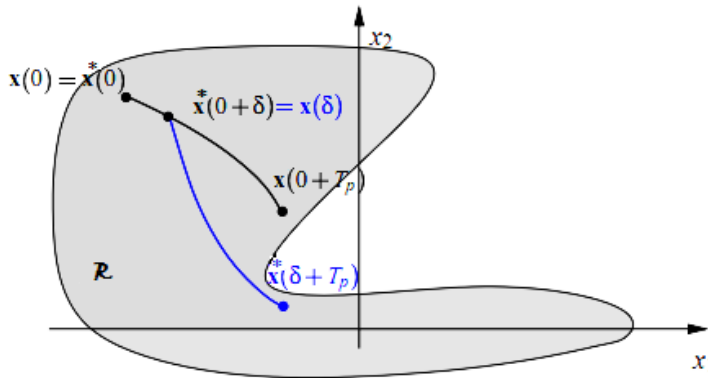
$$x(t_{i+1}) = x^*(t_{i+1}; \bar{u}^*(\tau; x(t_i)), x(t_i)) \quad (۱۲-۵)$$

بنابراین، قسمت باقیمانده از ورودی بهینه $\bar{u}^*(\tau; x(t_i))$ به ازای $\tau \in [t_{i+1}, t_i + T_p]$ محدودیت‌های حالت و ورودی را برآورده خواهد کرد. علاوه بر این، $x \in \Omega$ $x(t_i + T_p; \bar{u}^*(\tau; x(t_i)), x(t_i)) \in \Omega$ بوده و با وجود فرض ۲ تئوری ارائه شده برای همه‌ی $x \in \Omega$ که در آن کوچکترین ورودی واحد $u_\Omega(0)$ به ناحیه‌ی Ω همگرا شده و در $[t_i + T_p, t_i + T_p + \bar{\pi}]$ تغییرناپذیر است، موجود می‌باشد. پس مانده‌ی هر ورودی نیز همانند ورودی مجاز برای زمان‌های $t_i + \sigma$ به ازای $\sigma \in [0, t_{i+1} - t_i]$ به دست می‌آید.

$$\tilde{u}(\tau; x(t_i + \sigma)) = \begin{cases} \bar{u}^*(\tau; x(t_i)) & , \tau \in [t_i + \sigma, t_i + T_p] \\ u_\Omega(\tau - t_i - T_p) & , \tau \in [t_i + T_p, t_i + T_p + \sigma] \end{cases} \quad (۱۳-۵)$$

به خصوص این‌که، ما برای زمان نمونه‌برداری بعدی $\sigma = t_{i+1} - t_i$ یک ورودی شدنی داریم، از این رو شدنی بودن در زمان t_i ، شدنی بودن در t_{i+1} را نتیجه می‌دهد. بنابراین، اگر معادله‌ی (۵-۶) برای $t = 0$ شدنی باشد، آنگاه برای تمامی $t \geq 0$ شدنی می‌باشد.

علاوه بر این، اگر حالت‌ها به ازای ورودی مجاز موجود به مبداء همگرا شوند، تجمع این نقاط ناحیه‌ی جذبی \mathcal{R} را تشکیل می‌دهند. شکل (۲-۵) ناحیه‌ی جذب مربوط به یک سیستم مرتبه‌ی دو را نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۵) ناحیه‌ی جذب یک سیستم مرتبه‌ی دو

همگرایی: ما در ابتدا تابع مقدار نزولی در لحظه‌ی شروع نمونه‌برداری را نشان داده و سپس آن را در سراسر زمان بررسی خواهیم نمود. به‌خاطر داشته باشید که مقدار V در $x(t_i)$ از رابطه‌ی زیر گرفته شده است.

$$V(x(t_i)) = \int_{t_i}^{t_i+T_p} F(x^*(\tau; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)), \bar{u}^*(\tau; x(t_i))) d\tau + E(x^*(t_i+T_p; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i))) \quad (14-5)$$

هزینه‌ی حاصل از رابطه‌ی (۱۳-۵) با شروع از $x(t_i; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i))$ به ازای

$\sigma \in (0, t_{i+1} - t_i]$ و استفاده از ورودی $\tilde{u}(\tau; x(t_i + \sigma))$ توسط رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$J(\tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma)) = \int_{t_i + \sigma}^{t_i + \sigma + T_p} F(x^*(\tau; \tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma)), \tilde{u}(\tau; x(t_i + \sigma))) d\tau + E(x^*(t_i + \sigma + T_p; \tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma))) \quad (15-5)$$

با فرمول‌سازی دوباره و ترکیب معادلات فوق عبارت زیر حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned}
J(\tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma)) - V(x(t_i)) = & \\
& \int_{t_i + \sigma}^{t_i + \sigma + T_p} F(x^*(\tau; \tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma)), \tilde{u}(\tau; x(t_i + \sigma))) d\tau \\
& + E(x^*(t_i + \sigma + T_p; \tilde{u}(0; x(t_i + \sigma)), x(t_i + \sigma))) \quad (16-5) \\
& - \int_{t_i}^{t_i + \sigma} F(x^*(\tau; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)), \bar{u}^*(\tau; x(t_i))) d\tau \\
& - E(x^*(t_i + T_p; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)))
\end{aligned}$$

و سپس با انتگرال گیری از رابطه‌ی (۱۱-۵) در بازه‌ی $t_i + \sigma$ تا $t_i + \sigma + T_p$ و شروع از شرایط

اولیه‌ی $x(t_i + \sigma)$ سه ترم معادله‌ی فوق به شکل زیر صفر شده و داریم:

$$J(\dots) - V(x(t_i)) \leq - \int_{t_i}^{t_i + T_p} F(x^*(\tau; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)), \bar{u}^*(\tau; x(t_i))) d\tau \quad (17-5)$$

از آن جایی که ورودی $\tilde{u}(\dots)$ تنها شدنی بوده و لزوماً ورودی بهینه برای $x(t_i + \sigma)$ نمی-

باشد، می توان عبارت فوق را این گونه بازنویسی نماییم:

$$V(x(t_i + \sigma)) - V(x(t_i)) \leq - \int_{t_i}^{t_i + T_p} F(x^*(\tau; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)), \bar{u}^*(\tau; x(t_i))) d\tau \quad (18-5)$$

رابطه‌ی فوق بیان کننده‌ی این است که تابع مقدار در طول زمان و در لحظه‌ی نمونه برداری

t_i نزولی می باشد. از این رو داریم:

$$V(x(t_{i+1})) - V(x(t_i)) \leq - \int_{t_i}^{t_{i+1}} F(x^*(\tau; \bar{u}^*(0; x(t_i)), x(t_i)), \bar{u}^*(\tau; x(t_i))) d\tau \quad (19-5)$$

با فرض کاهشی بودن تابع مقدار می توان گفت که برای تمامی $x(t_i) \neq 0$ آن اکیداً مثبت

است، و همین پایداری روش را تضمین می نماید. توجه داشته باشید که روش ارائه شده در مورد

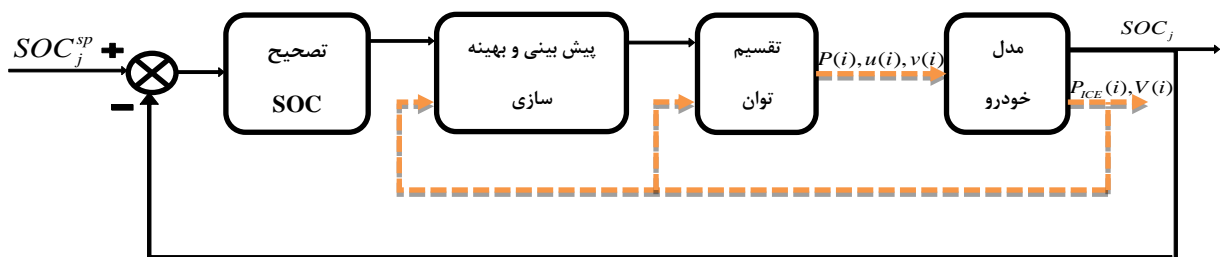
پایداری سیستم‌هایی است که فیدبک حالت دارند [۴۶]. برای این چنین سیستم‌هایی تعیین ناحیه‌ی

همگرایی نهایی Ω و ترم جریمه‌ی نهایی E نسبتاً دشوار می باشد.

۵-۵ 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. افق بهینه‌سازی برای اعمال کنترل محاسبه شده در زمان یک ثانیه ۴ نمونه (۴ ثانیه) می‌باشد، که البته در پایان چرخه‌ی رانندگی به صفر کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی‌ها فرض بر این است که NMPC هیچ دانشی در مورد آینده‌ی شیب جاده نداشته و تنها آگاهی آن تخمین و درونیابی شیب جاده در طول افق پیش‌بینی می‌باشد. و در نهایت حالت‌های واقعی در انتهای افق کنترل با شناخت شیب جاده از روی مدل شبیه‌سازی شده‌ی دقیق محاسبه خواهند شد.

آنچه که ظاهر استراتژی NMPC را پیچیده نموده، 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^۱ در شاخص عملکرد و استراتژی کنترل می‌گردد. در شکل (۵-۲) فرآیند اعمال NMPC بر روی خودروی الکتریکی هیبرید مورد نظر را نشان داده شده است.



—: دوره‌ی نمونه‌برداری کند ۴ ثانیه
 - - - - -: دوره‌ی نمونه‌برداری تند ۱ ثانیه

شکل (۵-۳) بلوک دیاگرام NMPC بر روی PHEV

^۱ Set Point(SP)

آنچه که در شکل فوق به روشنی قابل رویت است وجود دو دوره‌ی نمونه برداری تند و کند می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده‌ایم 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 بوده و سرعت انحراف SOC از سطح نامی کم بوده و می‌توان SOC به عنوان یک 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:

$$C_{Wbat,j} = \left(\frac{t_{f,j}}{t_f} \right) C_{Wbat,N} \quad (20-5)$$

که در آن $t_{f,j} \in [4, \dots, t_f]$ زمان پایانی در هر افق کنترل NMPC و C_{Wbat} ضریب جریمه‌ی انحراف SOC از سطح نامی 0.6 در زمان نهایی می‌باشند. حال به سادگی می‌توان با جایگزینی $t_{0,j}$ و $t_{f,j}$ به جای زمان شروع t_0 و زمان نهایی t_f در شاخص عملکرد ارائه شده در فصل چهارم داریم:

$$J(t_{0,j}, x_0) = \left(C_{bat,final} (\bar{W}_{bat}(t_{f,j}) - 0.6)^2 + \int_{t_{0,j}}^{t_{f,j}} L_E(t, x, u_0, u_1, v) dt \right) \quad (21-5)$$

که در آن $t_{0,j} \in [0, \dots, t_f - 1]$ و $t_{f,j} \in [4, \dots, t_f]$ بوده و مابقی ترم‌های موجود در شاخص عملکرد فوق در فصل چهارم تشریح شده است.

فرم شاخص عملکرد فوق به شکل تابع هزینه‌ی ارائه شده در بخش ۴-۵ می‌باشد، که توسط استراتژی NMPC بهینه شده است. بنابراین با استفاده از روش بیان شده به منی‌م‌سازی شاخص عملکرد فوق پرداخته و در فصل بعد نتایج شبیه‌سازی را بررسی خواهیم نمود.

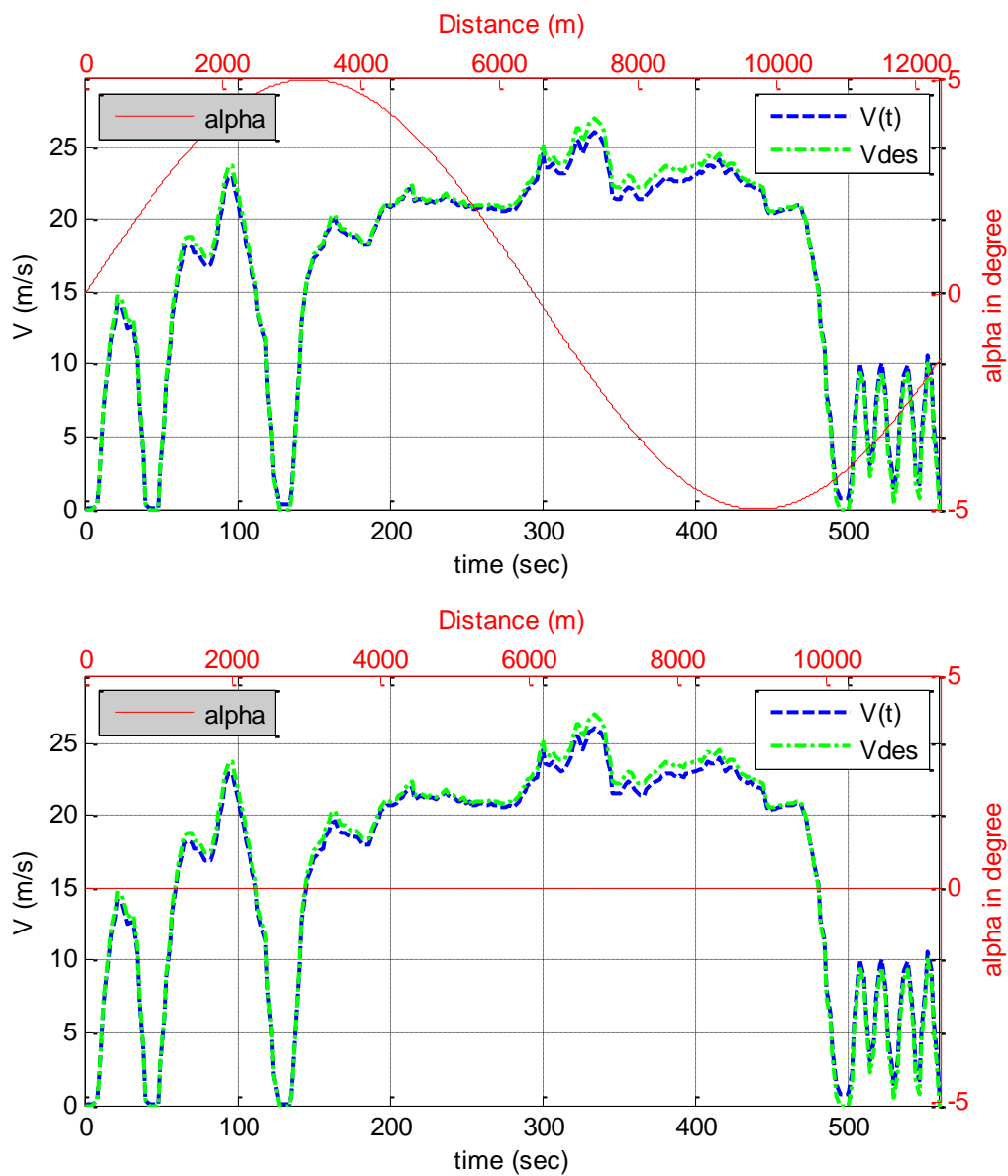
فصل هشتم:

نتیج شیه سازی

نتایج شبیه سازی

مشخصات رانندگی استفاده شده بر روی مدل شبیه‌سازی شدهی خودرو، سیکل استاندارد

آمریکایی US06 در دو شرایط جاده با شیب سینوسی ۵ درجه‌ای در شکل (۶-۱) و جاده‌ای صاف در

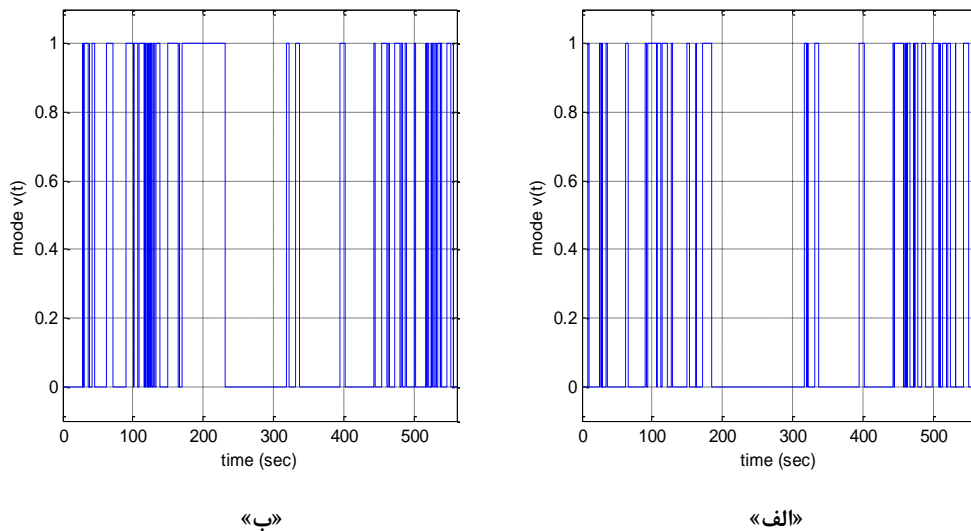


شکل (۶-۱) مشخصات رانندگی استاندارد US06 در شرایط: (۱) جاده با شیب سینوسی ۵ درجه‌ای، (۲) جاده‌ی صاف

شکل(۱-۱-۶) می‌باشد. در شکل(۱-۶) 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(۱-۶) 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 برای درجه‌بندی شرایط جاده‌ای منطبق بر زمان و سرعت خودرو تعبیه شده‌اند، که محور بالا و راست به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مسافت طی شده بر حسب متر(m) و مقدار شیب جاده بر حسب درجه(d) می‌باشند. در شکل(۱-۶) منحنی آبی سرعت لحظه‌ی خودرو، منحنی سبز سرعت درخواستی و منحنی قرمز شیب جاده می‌باشند..

شکل(۲-۶) 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.



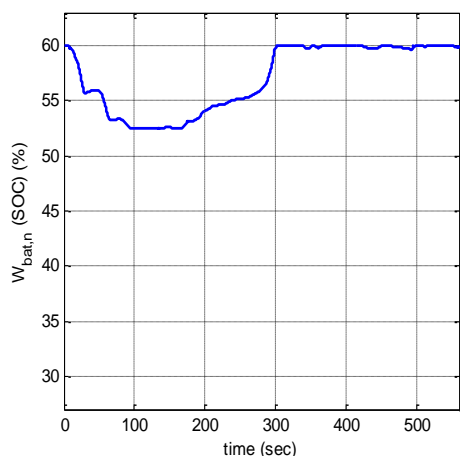
شکل(۲-۶) مد عملکردی خودرو مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی ۵ درجه‌ای، ب) جاده‌ی صاف

مقادیر ضرایب جریمه‌ی استفاده شده و عملکرد به‌دست آمده‌ی تابع هزینه تعریف شده با توجه به چرخه‌ی رانندگی مورد نظر مطابق جدول(۱-۶) می‌باشد.

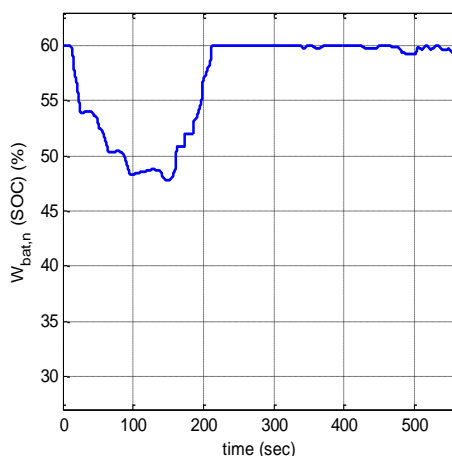
جدول (۶-۱) مقادیر ضرایب جریمه‌ی استفاده شده و عملکرد به دست آمده‌ی تابع هزینه

C_{ED}, \dots, C_{bat}	$C_{Wbat, N}$	C_{fr}	C_{ICE}	C_V	صرفه‌جویی سوخت	مقدار تابع هزینه	مقادیر با توجه به شیب جاده
0	10^5	10^{-4}	10^{-3}	10	20.54	$2.1696 \cdot 10^5$	شیب غیر صفر
0	10^5	10^{-4}	10^{-3}	10	21.18	$2.5126 \cdot 10^5$	شیب صفر

شکل (۶-۳) درصد شارژ باتری (SOC) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل پیداست، با توجه به استراتژی کنترلی به کار رفته در ابتدای چرخه‌ی رانندگی برای تامین نیروی رانشی شارژ باتری صرف تولید گشتاور در ED شده است. بعد از آن تقریباً تا مقدار ۵۰ درصد کاهش یافته و سپس با توجه به شرایط رانندگی توسط ED شارژ می‌گردد. با دقت به شکل الف و ب و تفاوت این دو متوجه می‌شویم که تغییرات SOC در حالت شرایط جاده‌ای صاف نرم‌تر می‌باشد، یعنی کاهش آن کمتر از ۱۰ درصد و سرعت شارژ دوباره زیادتر است، در حالی که در شرایط جاده‌ی شیب‌دار به دلیل وجود سربالایی در ابتدای چرخه‌ی رانندگی باتری بیشتر تخلیه شده و سپس بعد از قرارگیری در سرازیری باتری سریعاً شارژ شده و به نقطه‌ی تعیین خود که ۶۰ درصد می‌باشد، رسیده است.



«ب»

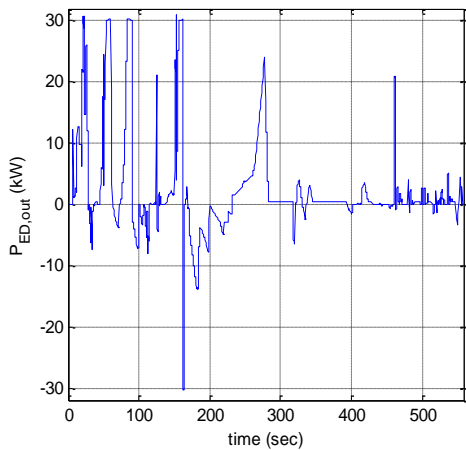


«الف»

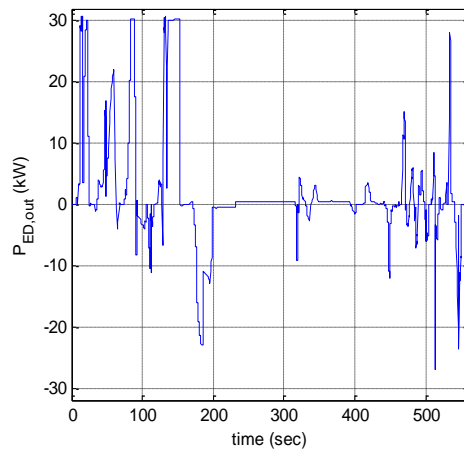
شکل (۶-۳) انرژی نرمالیزه شده‌ی باتری (SOC) مطابق با مشخصات رانندگی الف (جاده با شیب سینوسی، ب) جاده‌ی صاف

شکل (۴-۶) توان ورودی/خروجی راه‌انداز الکتریکی (ED) را نشان می‌دهد. توان‌های مثبت

نشان‌دهنده تولید توان مکانیکی خروجی در مد موتوری بوده و توان مکانیکی ورودی به ED در مد ژنراتوری با علامت منفی رسم شده است.



«ب»

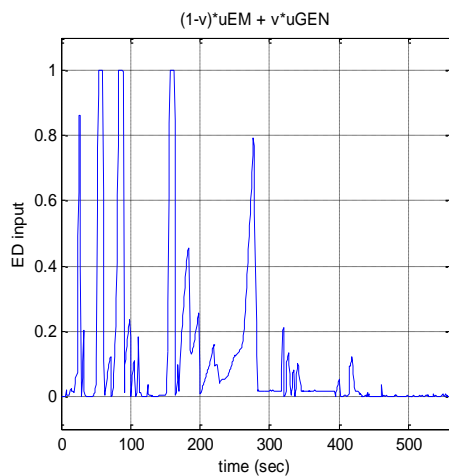


«الف»

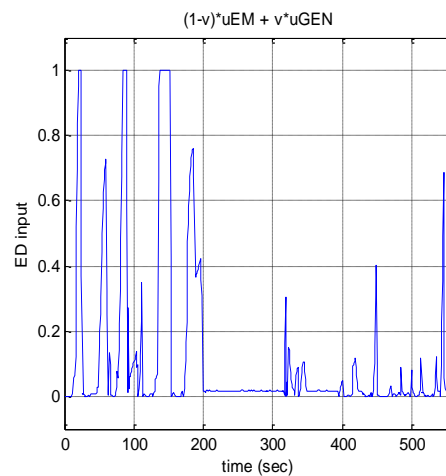
شکل (۴-۶) توان ورودی/خروجی ED مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده صاف

در شکل (۵-۶) کنترل اعمالی بر روی ED را نمایش داده‌ایم. این کنترل ترکیبی از سه ورودی کنترل

$u_{EM}(t)$ ، $u_{GEN}(t)$ و v می‌باشد که توسط رابطه $(1-v)u_{EM} + v u_{GEN}$ ترکیب شده و به ED



«ب»

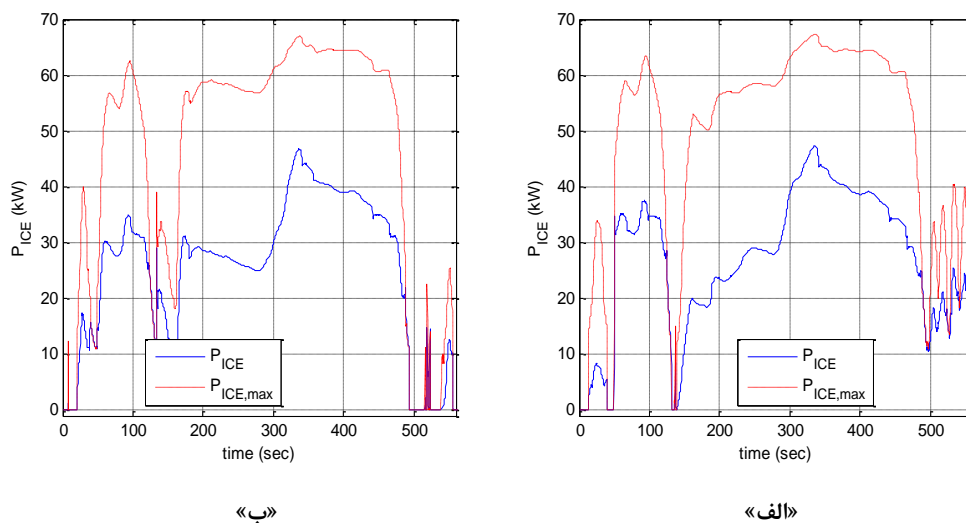


«الف»

شکل (۵-۶) ورودی کنترل ED مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده صاف

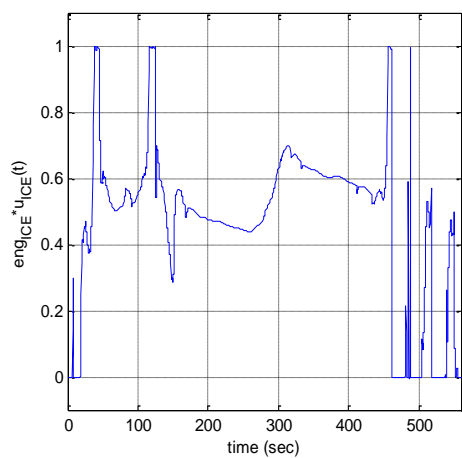
اعمال می‌گردد.

در شکل (۶-۶) منحنی تغییرات توان موتور احتراقی (ICE) را نمایش داده‌ایم. منحنی زیر 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، و سپس بعد از تقریباً 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. با توجه به دو شکل الف و ب در می‌یابیم که در شرایط جاده‌ای با شیب سینوسی توان تولیدی موتور احتراقی در مقایسه با جاده‌ی صاف در لحظه‌ی اولیه برای غلبه بر نیروی جرم در سربالایی بیشتر بوده و پس از اینکه خودرو در سرازیری قرار می‌گیرد، با اینکه سرعت شارژ در شرایط جاده‌ای با شیب سینوسی بیشتر می‌باشد، حالت برعکس رخ داده است.

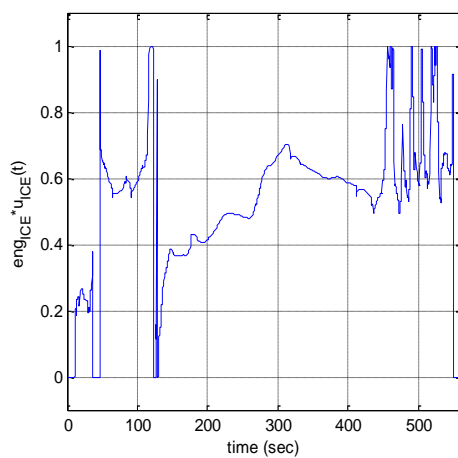


شکل (۶-۶) توان خروجی ICE مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده‌ی صاف

شکل (۶-۷) ورودی کنترلی موتور احتراقی ICE را نشان می‌دهد. کنترل‌های مستقیم بر روی ICE دو ترم $eng(t)$ و $u_{ICE}(t)$ می‌باشند که به ترتیب عمل روشن و خاموش سازی و کنترل میزان توان‌دهی ICE را انجام می‌دهند. از اینرو کنترل ICE از ضرب این دو کنترل به‌دست خواهد آمد.



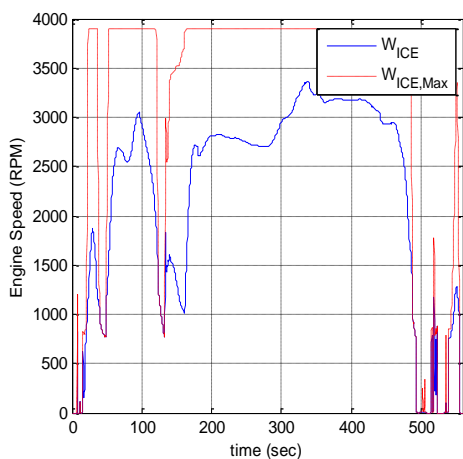
«ب»



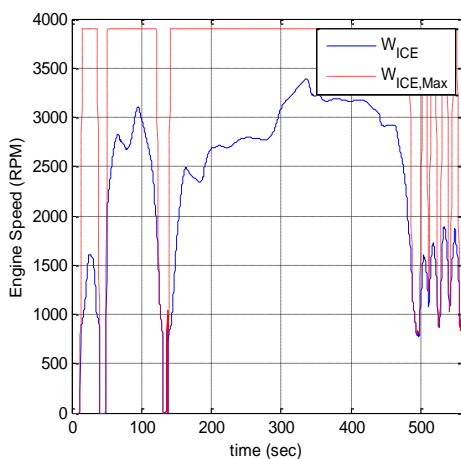
«الف»

شکل (۶-۷) ورودی کنترل ICE مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده‌ی صاف

شکل (۶-۸) سرعت دوران موتور احتراقی را نمایش می‌دهد. این منحنی با نمودار توان



«ب»



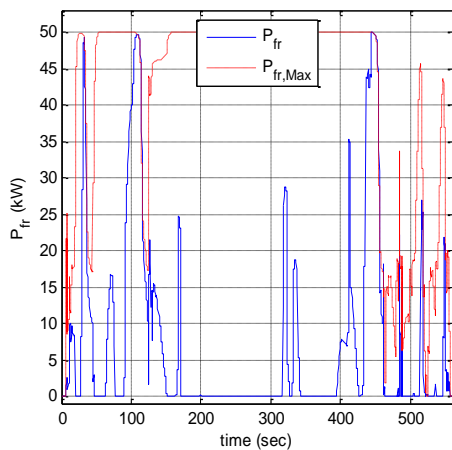
«الف»

شکل (۶-۸) سرعت دوران ICE مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده‌ی صاف

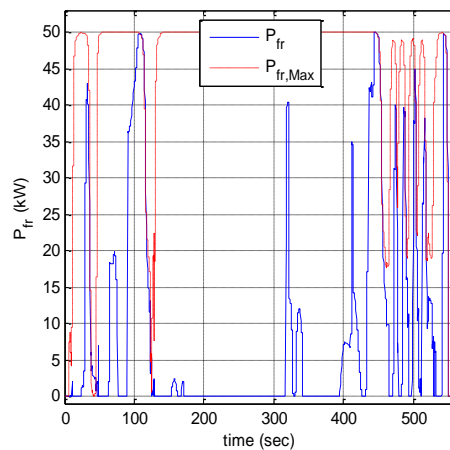
تولیدی ICE مطابقت داشته و درارای ویژگی‌های یکسانی می‌باشند. در این شکل منحنی آبی رنگ

سرعت لحظه‌ای ICE و منحنی خط چین قرمز رنگ حداکثر توانایی ICE را نمایش می‌دهند.

شکل (۶-۹) نمودار توان تلف شده حاصل از ترمز اصطکاکی را نشان می‌دهد. این توان در صورت نیاز به ترمز اصطکاکی برای کاهش سرعت خودرو استفاده می‌گردد. آنچه که از این شکل می‌توان نتیجه گرفت اختلاف صرفه جویی سوخت در دو شرایط جاده‌ای مختلف که در جدول (۶-۱) آمده است، می‌باشد. و دلیل مصرف سوخت بیشتر در حالت جاده با شیب سینوسی استفاده از ترمز اصطکاکی برای کاهش سرعت در شیب جاده بوده که این کمبود توان به صورت حرارت در چرخ‌ها تلف شده است.



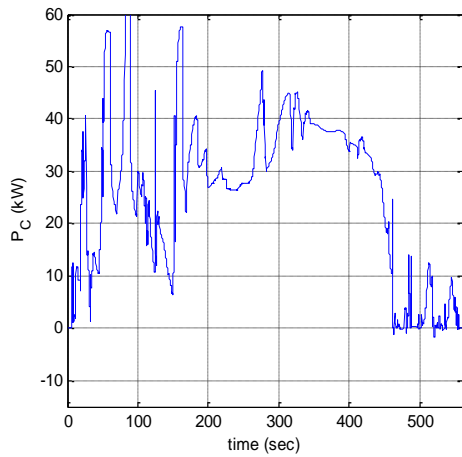
«ب»



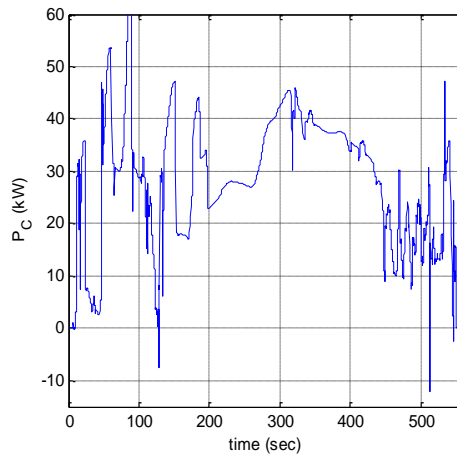
«الف»

شکل (۶-۹) توان ترمز اصطکاکی مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده‌ی صاف

در شکل (۶-۱۰) نیز توان ورودی/خروجی اجزای کولپینگ (CDD) را نمایش می‌دهیم. این توان، گشتاور جاری بین چرخ‌ها و CDD می‌باشد. توان‌های مثبت از CDD به چرخ‌ها و توان‌های منفی نیروی بازگشتی از چرخ‌ها به CDD می‌باشند.



«ب»



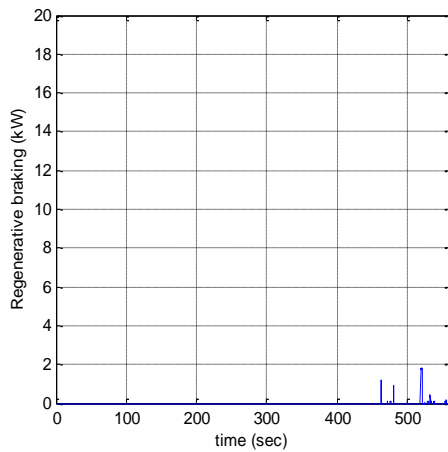
«الف»

شکل (۶-۱۰) توان ورودی/خروجی CDD مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده صاف

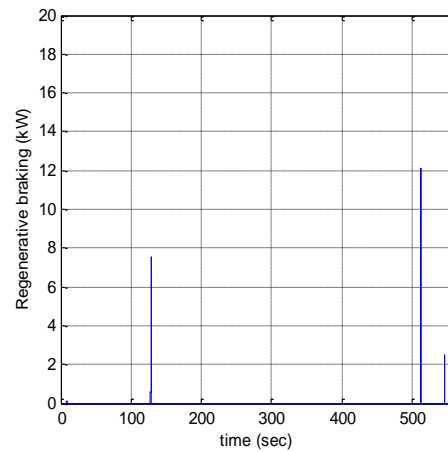
شکل (۶-۱۱) نشان دهنده توان بازیابی شده از چرخ‌ها به سیستم را نشان می‌دهد. این

منحنی مجموعه توان‌های منفی شکل (۶-۱۰) می‌باشد. دلیل بازیابی بیشتر در شرایط جاده با شیب

سینوسی نیز همان شیب منفی جاده می‌باشد.



«ب»



«الف»

شکل (۶-۱۱) توان بازیابی شده ترمزی مطابق با مشخصات رانندگی الف) جاده با شیب سینوسی، ب) جاده صاف

تمامی منحنی‌های رسم شده در فوق مطابق با معادلات مدل‌سازی بیان شده در فصل چهارم می‌باشند، که به صورت ظریف از آن‌ها تبعیت می‌کنند. ما در این فصل برای پرهیز از تکرار این معادلات از آوردن آن‌ها اجتناب نموده و تنها به نمایش نتایج اکتفا نموده‌ایم.

فصل، مضمون:

نتیجہ گیری

نتیجه‌گیری

ما در این تحقیق از تئوری کنترل بهینه‌ی هیبرید برای حل مسئله‌ی کنترل مدیریت توان در خودروهای الکتریکی هیبرید موازی استفاده نمودیم. همان‌طور که در متن پایان‌نامه تشریح شد، وجود دینامیک گسسته‌ی مد عملکردی ما را ملزم به استفاده از این استراتژی کنترلی نموده است. بیان مسئله‌ی کنترل بهینه‌ی جایگزین عمل ادغام دو شاخص عملکرد مد موتوری و ژنراتوری را انجام می‌دهد، و در نهایت شاخص عملکرد تعریف شده را به کمک تئوری کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی بهینه نمودیم. از مزایای روش به‌کار گرفته شده می‌توان به دستیابی به بهینه‌ی مطلوب در مشخصات مختلف رانندگی با استفاد از روش‌های عددی ساده اشاره نمود. عملکردهای گوناگون بدست آمده در شبیه‌سازی مانند صرفه‌جویی سوخت، توان‌های ورودی و خروجی، کنترل‌های اعمال شده به زیرسیستم‌ها و غیره مطابق با درک ما از مدل ارائه شده‌ی خودرو می‌باشد. این نتایج منطبق درجه‌ی اعتماد ما 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] Wouk, V. (1995). "Hybrids: then and now." IEEE Spectrum **32**(7): 16-21.
- [۲] محسن اصفهانیان، اکبر رهیده، مصطفی شاه‌نظری، (۱۳۸۰). "بررسی انواع ساختارهای سیستم انتقال قدرت در خودروهای هیبرید: قسمت اول سیستم سری"، اولین همایش خودروهای هیبرید، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- [۳] محسن اصفهانیان، اکبر رهیده، مصطفی شاه‌نظری، (۱۳۸۰). "بررسی انواع ساختارهای سیستم انتقال قدرت در خودروهای هیبرید: قسمت دوم سیستم موازی"، اولین همایش خودروهای هیبرید، دانشگاه علم و صنعت ایران
- [4] K.T Chau, Y. S. W. (2002). "Overview of power management in hybrid electric vehicle." Energy Conversion and Management **43**(15): 1953-1968.
- [۵] صادقی، سیاوش، (۱۳۸۷). "خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی (ساختارها، نحوه‌ی عملکرد، مدل‌سازی و شبیه‌سازی)"، انتشارات مشعل اصفهان
- [6] Wakefield, E. H. (1988). History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Cars, SAE International.
- [7] Lei Wang, Y. Z., Chengliang Yin, Hu Zhang, Cunlei Wang (2012). "Hardware-in-the-loop simulation for the design and verification of the control system of a series-parallel hybrid electric." Simulation Modelling Practice and Theory **25**: 148-162.
- [8] K. David Huang, S.-C. T. (2004). "A new parallel-type hybrid electric-vehicle." Applied Energy **79**(1): 51-64.
- [9] Aylor, S. P., M.; Maxwell, T.; Jones, J. (1998). "Electrically assisted, hybrid vehicle." Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th IEEE **3**: 2089/1 - 2089/6.
- [10] Dookhwan Choi, H. K. (2002). "Evaluation of fuel economy for a parallel hybrid electric vehicle." KSME International Journal **16**(10): 1287-1295.

- [11] Rolf Pfiffner, L. G. (2001). "Optimal operation of CVT-based powertrains." *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **11**(11): 1003-1021.
- [12] Morteza Montazeri-Gh, A. P., Babak Ghalichi (2006). "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming." *Journal of the Franklin Institute* **343**(4-5): 420-435.
- [13] Chan-Chiao Lin; Huei Peng; Grizzle, J. W. J.-M. K. (2003). "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck." *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* **11**(6): 839-849.
- [14] Koot, M. K., J.T.B.A.; de Jager, B.; Heemels, W.P.M.H.; van den Bosch, P.P.J.; Steinbuch, M. (2005). "Energy management strategies for vehicular electric power systems." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* **54**(3): 771-782.
- [15] Sorin C. Bengea, R. A. D. (2005). "Optimal control of switching systems." *Automatica* **41**(1): 11-27.
- [16] Xiaoling He; Hodgson, J. W. (2002). "Modeling and simulation for hybrid electric vehicles." *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* **3**(4): 235 - 243.
- [17] Y. Zhang, H. L., B. Zhang, and C. Mi (2006). "Performance modeling and optimization of a novel multi-mode hybrid powertrain." *Journal of Mechanical Design* **128**(79): 79-89.
- [18] Phillips, A. M. J., M.; Bailey, K.E. (2000). "Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle." *Control Applications. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on* 297 - 302
- [19] Jong-Seob Won; Langari, R. E., M. (2005). "An energy management and charge sustaining strategy for a parallel hybrid vehicle with CVT." *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* **13**(2): 313-320.
- [20] Diop, D. A.-A., Y.; Kauffmann, J.M.; El Kadri, K. (2002). "Power management of a series hybrid electric vehicle." *Vehicular Technology Conference* **4**: 2109 - 2118
- [21] X. Wei, V. U., G. Rizzoni, and L. Guzzella (2007). "Model-based fuel optimal control of hybrid electric vehicle using variable structure control systems." *J. Dyn. Sys., Meas., Control* **129**(1): 7-13.
- [22] Bodson, M. C., J.N.; Novotnak, R.T. (1995). "Systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors." *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* **3**(4): 388-397.

- [23] Wasynczuk, O. S., S.D.; Corzine, K.A.; Tichenor, J.L.; Krause, P.C.; Hansen, I.G.; Taylor, L.M. (1998). "A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* **13**(2): 163 - 169.
- [24] K. Uthaichana , R. D. y., S.Bengea z, M. Zefran x, and S. Pekarek (2011). "Hybrid optimal theory and predictive control for power management in hybrid electric vehicle." *Journal of Nonlinear Systems and Applications*: 96-110.
- [25] K. Uthaichana, S. B., R. DeCarlo, S. Pekarek, and M. Zefran (2008). "Hybrid model predictive control tracking of a sawtooth driving profile for an hev." *American Control Conference*: 967 - 974
- [26] Pekarek, S. U., K.; Bengea, S.; DeCarlo, R.; Zefran, M. (2005). "Modeling of an electric drive for a HEV supervisory level power flow control problem " *Vehicle Power and Propulsion*.
- [27] Paganelli, G. D., S.; Guerra, T.M.; Rimaux, J.; Santin, J.J. (2002). "Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains " *Vehicular Technology Conference* **4**: 2076 - 2081.
- [28] J. Richalet, A. R., J.L. Testud, J. Papon (1978). "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes." *Automatica* **14**(5): 413-428.
- [29] Minyue Fu, Z.-Q. L., Yinyu Ye (1998). "Approximation Algorithms for Quadratic Programming." *Journal of Combinatorial Optimization* **2**: 29- 50.
- [30] Kvasnica, M. F., M. (2012). "Clipping-Based Complexity Reduction in Explicit MPC." *Automatic Control, IEEE Transactions on* **57**(7): 1878 - 1883
- [31] S.Joe Qin, T. A. B. (2003). "A survey of industrial model predictive control technology." *Control Engineering Practice* **11**(7): 733-764.
- [32] X.W. Zhang, S. H. C., H.K. Ho, Jun Li, Guojun Li, Zhenping Feng (2008). "Nonlinear model predictive control based on the moving horizon state estimation for the solid oxide fuel cell " *International Journal of Hydrogen Energy* **33**(9): 2355-2366.
- [33] Lars Imsland, R. F., Eric Bullinger, Frank Allgöwer, Bjarne A. Foss (2003). "A note on stability, robustness and performance of output feedback nonlinear model predictive control." *Journal of Process Control*, Volume 13, Issue 7, October 2003, Pages 633-644 **13**(7): 633-644.
- [34] D.Q. Mayne, J. B. R., C.V. Rao, P.O.M. Scokaert (2000). "Constrained model predictive control: Stability and optimality." *Automatica* **36**(6): 789-814.

- [35] Fontes, F. A. C. C. (2001). "A general framework to design stabilizing nonlinear model predictive controllers." *Systems & Control Letters* **42**(2): 127-143.
- [36] Bartlett, R. A. W., A.; Biegler, L.T. (2000). "Active set vs. interior point strategies for model predictive control " *American Control Conference* **6**: 4229-4233.
- [37] Tousain, R. L. B., O.H. (2000). "Efficient dynamic optimization for nonlinear model predictive control-application to a high-density poly-ethylene grade change problem " *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on* **1**: 760 - 765.
- [38] Nuno M.C. De Oliveira, L. T. B. (1995). "An extension of Newton-type algorithms for nonlinear process control " *Automatica* **31**(2): 281-286.
- [39] M. Diehl, R. F., S. Schwarzkopf, I. Uslu, F. Allgöwer, H. G. Bock, Ernst-Dieter Gilles, J. P. Schlöder (2003). "An Efficient Algorithm for Nonlinear Model Predictive Control of Large-Scale Systems." *Automatisierungstechnik* **51**(1): 22-29.
- [40] Findeisen, R. D., M.; Disli-Uslu, I.; Schwarzkopf, S.; Allgower, F.; Bock, H.G.; Schloder, J.P.; Gilles, E.D. (2002). "Computation and performance assessment of nonlinear model predictive control " *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on* **4**: 4613 - 4618.
- [41] V. Adetola, M. G. (2010). "Integration of real-time optimization and model predictive control." *Journal of Process Control* **20**(2): 125-133.
- [42] Jasem Tamimi, P. L. (2010). "A combined approach to nonlinear model predictive control of fast systems." *Journal of Process Control* **20**(9): 1092-1102.
- [43] V. Adetola, M. G. (2010). "Integration of real-time optimization and model predictive control." *Journal of Process Control* **20**(2): 125-133.
- [44] Allgower, H. C. a. F. (1998). "A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability." *Automatica* **34**: 1205-1218.
- [45] D. Megías, J. S., C. de Prada (2002). "Min-max constrained quasi-infinite horizon model predictive control using linear programming." *Journal of Process Control* **12**(4): 495-505.
- [46] Fontes, F. A. (2000). "A general framework to design stabilizing nonlinear model predictive controllers." *Control Systems* **42**: 127-143.
- [47] A. Jadbabaie, J. Y., and J. Hauser (2001). "Unconstrained receding horizon control of nonlinear systems." *IEEE Transactions Automatical Control* **46**: 776-783.

- [48] A. Rahideh , M. H. S. (2012). "Constrained output feedback model predictive control for nonlinear systems." *Control Engineering Practice* **20**: 431 –443.
- [49] Pin, G. P., T (2011). "Networked Predictive Control of Uncertain Constrained Nonlinear Systems: Recursive Feasibility and Input-to-State Stability Analysis." *Automatic Control, IEEE Transactions on* **56**(1): 72 - 87.
- [50] Eranda Harinath, L. T. B., Guy A. Dumont (2011). "Control and optimization strategies for thermo-mechanical pulping processes: Nonlinear model predictive control." *Journal of Process Control* **21**(4): 519-528.

ABSTRACT

Mohammad Taghi Nodeh, M.S., Sharood University of Technology, February 2013.
Predictive control strategy for power management in parallel hybrid electric vehicle(PHEV).

In this thesis we describe the modeling of hierarchical control and implementation of nonlinear model predictive control for parallel hybrid electric vehicles(PHEV). Three levels characterize the hierarchical form: supervisor, coordinator, and local, although this thesis only develops the supervisory level control strategy. The PHEV model consists of an internal combustion engine (ICE), battery-electric-drive, coupling device and differential, and vehicle dynamics. For various (velocity and road grade) driving profiles such as a US06 profiles, a supervisory level controller is computed and detailed for the solution of the associated PHEV power management problem. Specifically, the supervisory controller decides on the (optimal) power flows among the subsystems, i.e., the modes of operation and the power split between the ICE and the battery-electric-drive to achieve optimal or near-optimal performance, e.g., the trade-off between power usages, desired velocity tracking, battery charge sustaining and drivability constraints for each of the driving profiles. Solution of this problem requires an underlying mathematical power flow model that captures pertinent physical properties of the subsystems and that presupposes the given hierarchical control structure. The supervisory problem solution yields power profiles that are to be tracked by the local/decentralized controllers of the subsystems.

The developed power flow model is amenable to recent advances in hybrid optimal control theory. In hybrid optimal control, different modes of operation as well as classical control inputs are utilized. For the PHEV there are two modes of operation (motoring or generating) determined by the mode of operation of the electric-drive as a motor or generator. For practicability in computing and implementing the optimal (power flow) control technique in real time, a nonlinear model predictive control strategy is also adopted for computing sub-optimal solution to the power management problem.

Keywords: Nonlinear model predictive control - parallel hybrid electric vehicles - Power Management - Nonlinear Model



Shahrood University of Technology

Faculty Electrical and Robotic

**PREDICTIVE CONTROL STRATEGY FOR POWER MANAGEMENT
IN PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEHICLE**

Mohammad Taghi Nodeh

**Supervisor(s):
Hossein Gholizade-Narm
Amin Hajizadeh-Gostag**

Date: February 2013