دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

استفاده از توابع زمانی متعامد در حل مساله کنترل بهینه و کاربرد آن در مصرف سوخت خودرو هیبرید

رساله دکترای مهندسی برق

روح الله دوست حسینی

استاد راهنما

دکتر فرید شیخ الاسلام

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

رساله دکترای مهندسی برق -کنترل آقای روح الله دوست حسینی

تحت عنوان

استفاده از توابع زمانی متعامد در حل مساله کنترل بهینه و کاربرد آن در مصرف سوخت خودرو هیبرید

در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۲۳ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت .

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر فرید شیخ الاسلام
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر عباس کوزانی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر سعید حسین نیا
۴- استاد داور	دکتر محمد جواد یزدان پناه
۵- استاد داور	دکتر محمد دانش
۶- استاد داور	دکتر جواد عسگری
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود برجی

تشکر و قدردانی

اکنون که به لطف خدای متعال دوره دکترای خود را به اتمام رسانیده ام، جا دارد از کلیه کسانی که اینجانب را در این دوره راهنمایی نموده اند تشکر و قدردانی نمایم. بدینوسیله از جناب آقای دکتر فرید شیخ الاسلام استاد راهنمای رساله و آقایان دکتر عباس کوزانی و دکتر سعید حسین نیا، اساتید مشاور رساله که در مراحل مختلف انجام این رساله و این دوره اینجانب را راهنمایی نموده اند ، صمیمانه تشکر و قدردانی کرده و از خداوند متعال توفیق روز افزون ایشان را خواستارم. از آقایان دکتر یزدان پناه، دکتر دانش و دکتر عسگری که داوری رساله را به عهده داشتند، کمال تشکر را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر مدرس هاشمی و سرکار خانم نکویی به خاطر زحمات بی دریغشان در طول دوران تحصیل ، قدردانی می نمایم.

كليه حقوق مادي مترتب بر نتايج مطالعات، ابتكارات و نوآوريهاي ناشي از تحقيق موضوع اين رساله متعلق به دانشگاه صنعتي اصفهان است.

تقدیم به پدرم،

راهنمای من در طول زندگی،

پیشکش به مادرم،

که بهشت زیر پای اوست

و

همسرم،

که در تمامی مسیر مرا همراهی نموده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....هشت

چکیده.....۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- تاریخچه خودروی هیبرید.....۲

۱-۲- پیشینه و کارهای انجام شده.....۱۱

۱-۲-۱- مدلسازی و شبیه سازی.....۱۱

۱-۲-۲- مدلسازی خودروی هیبرید.....۱۳

۱-۳- استراتژی کنترل نظارتی در خودروی هیبرید موازی.....۱۵

۱-۴- مقدمه ای بر روش مستقیم.....۲۱

۱-۵- مقدمه ای بر توابع هیبرید.....۲۵

۱-۶- کنترل بهینه خودروی هیبرید با حضور نامعینی در سیستم.....۲۶

فصل دوم: مدل دینامیکی خودروی هیبرید

۲-۱- مقدمه.....۲۹

۲-۲- مدل دینامیکی بر اساس مدل خطی ویلانز جهت بهینه سازی مصرف سوخت.....۲۹

۲-۳- مدل دینامیکی خودروی هیبرید دو دیفرانسیلی.....۳۵

۲-۴- مدل دینامیکی خودروی هیبرید سری.....۳۸

۲-۵- مدل دینامیکی خودروی هیبرید بر مبنای مینیمم کردن میزان آلایندگی محیطی.....۴۱

۲-۶- مدل دینامیکی خودروی هیبرید بر اساس وضعیت شارژ باتری.....۴۴

۲-۷- مدل دینامیکی خودروی هیبرید بر اساس تعادل توان.....۴۵

۲-۷-۱- تعریف مساله کنترل بهینه سوخت در خودروی هیبرید.....۴۶

فصل سوم: حساب تغییرات نامعین

۳-۱- مقدمه.....۴۹

۳-۲- توابع متعامد.....۵۲

۳-۲-۱- چند جمله ای های لژاندر.....۵۴

۳-۲-۲- چند جمله‌ای لاگوئر.....۵۵

۳-۲-۳- چند جمله ای هرمیت..... ۵۷
۳-۲-۴- چند جمله‌ای چبی شف از نوع اول..... ۵۹
۳-۲-۵- چند جمله‌ای چبی شف از نوع دوم..... ۶۰
۳-۲-۶- چند جمله‌ای ژاکوبی..... ۶۱
۳-۲-۷- چند جمله‌ای گگنبوئر..... ۶۳
۳-۳- ماتریس عملیاتی انتگرال..... ۶۴
۳-۴- چند جمله ای های قطعه قطعه پیوسته..... ۶۶
۳-۴-۱- توابع هار..... ۶۶
۳-۴-۲- توابع رید ماچر..... ۶۷
۳-۴-۳- توابع والش..... ۶۸
۳-۴-۴- توابع بلاک پالس..... ۶۹
۳-۵- حل مساله کنترل بهینه سوخت خودرو با استفاده از روش مستقیم..... ۷۳
۳-۶- نتایج شبیه سازی کنترل سوخت خودروی هیبرید..... ۷۷
۳-۶-۱- حل مساله کنترل بهینه با استفاده از توابع لژاندر..... ۷۷
۳-۶-۲- حل مساله کنترل بهینه با استفاده از توابع چبی شف..... ۷۸
۳-۶-۳- حل مساله کنترل بهینه با استفاده از توابع موجک هار..... ۷۹
فصل چهارم: کنترل بهینه خودروی هیبرید با استفاده از توابع هیبرید
۴-۱- مقدمه..... ۸۱
۴-۲- توابع هیبرید بلاک پالس و چندجمله ای لژاندر..... ۸۲
۴-۳- حل مساله با استفاده از روش توابع هیبرید..... ۸۵
۴-۴- شبیه سازی مساله کنترل سوخت در خودروی هیبرید با استفاده از توابع هیبرید..... ۸۷
فصل پنجم: کنترل بهینه خودروی هیبرید در حضور نامعینی در سیستم
۵-۱- مقدمه..... ۹۱
۵-۲- کنترل بهینه سیستم های دارای نامعینی..... ۹۲
۵-۳- تعریف مساله حساب تغییرات نامعین..... ۹۴
۵-۴- شرایط لازم برای داشتن حل بهینه به ازای نامعینی در معادلات حالت و یا هزینه سیستم..... ۱۰۴
۵-۵- شرایط لازم برای داشتن حل بهینه به ازای نامعینی در شرایط اولیه مساله..... ۱۱۲
۵-۶- کنترل بهینه مصرف سوخت خودروی هیبرید به ازای نامعینی در معادلات سیستم..... ۱۱۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۹
۵-۲- پیشنهادات ۱۲۱
مراجع ۱۲۳

چکیده

هدف از انجام این رساله ارائه یک روش بهینه برای کنترل و طراحی بهینه سوخت خودروهای الکتریکی هیبرید می باشد. امروزه اکثر شرکت های خودروسازی راهکارهای گوناگونی جهت کم کردن هزینه های خودرو بویژه در مصرف سوخت نظیر خودروهای الکتریکی هیبرید ارائه داده اند. در این خودروها از انرژی الکتریکی و سوخت های فسیلی نظیر بنزین، گازوئیل و گاز بطور همزمان در تهیه توان لازم در خودرو استفاده می شود. مزیت اصلی این خودروها نسبت به خودروهای معمول که فقط از سوخت فسیلی استفاده می کنند، در روش های کنترلی مدرن و استفاده از دو منبع انرژی می باشد. ارائه روش های کنترلی گوناگون در این خودروها جهت تخصیص میزان توان لازم از هر نوع انرژی در طول مسیر، از شاخص های مهم این خودروها می باشد. داشتن یک کنترل کننده بهینه به نحوی که بتواند میزان سوخت فسیلی مصرفی در خودرو را مینیمم کند تا میزان آلایندگی کاهش یابد، بسیار حایز اهمیت است. در این رساله به دنبال بررسی راه کارهای بهینه مناسب جهت رسیدن به یک استراتژی بهینه در خودروهای هیبرید هستیم.

بهینه سازی سیستم های کنترلی از مسائلی است که از دیرباز مورد توجه قرار داشته است. پیدا کردن یک ورودی کنترل که بتواند معیارهای مورد نظر یک سیستم را اکسترمم کند، مساله اصلی بهینه سازی به شمار می آید. در مسائل کنترل بهینه، پارامترهای مجهول، متغیرهای کنترل و متغیرهای وضعیت هستند؛ در این گونه مسائل، هدف، تعیین ورودی کنترل و متغیرهای وضعیت متناظر با آن می باشد به نحوی که معیارهای سیستم مورد نظر را بهینه کرده و در شرایط مساله نیز صدق کند. از جمله روش هایی که می تواند برای حل مسائل کنترل بهینه مورد استفاده قرار گیرد، روش مستقیم و توابع هیبرید می باشد. ایده اصلی این دو روش، تبدیل مساله کنترل بهینه به یک گروه از معادلات جبری که حل آن بسیار ساده تر از حل مساله اصلی است، می باشد.

از آن جهت که در بسیاری از مسایل کنترل بهینه استفاده از تئوری کنترل و اصل حداقل یابی پنتریاگن به دلیل پیچیدگی سیستم های واقعی بسیار سخت و دشوار بوده است، ارایه روش های کنترل بهینه جدید این مساله را ساده ترمی کند. از جمله روش های بکارگرفته شده در کنترل بهینه سوخت خودروهای هیبرید استفاده از برنامه نویسی دینامیکی و برنامه نویسی غیر خطی می باشند. از معایب این روش نیز گسسته سازی مساله کنترل بهینه و حل آن به روش عددی می باشد. همچنین پدیده نفرین ابعاد در روش مستقیم از دیگر معایب استفاده از این تکنیک ها می باشد. در این رساله سعی شده تا با استفاده از خواص توابع متعامد پیوسته و قطعه قطعه پیوسته در روش های مستقیم و توابع هیبرید، مساله کنترل بهینه سوخت خودروی هیبرید حل گردد. از ویژگی های متمایز این دو روش، استفاده از حل معادلات جبری بجای استفاده از حل معادلات دیفرانیسل با شرایط مرزی در دو طرف بازه می باشد.

از آنجا که در سیستم های واقعی، نامعینی در سیستم وجود دارد، ارایه روش های کنترلی با حضور نامعینی در سیستم از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این رساله سعی شده است تا با استفاده از قضیه کنترل بهینه و حساب تغییرات، کنترل مصرف سوخت خودروی هیبرید را در حضور نامعینی در سیستم مینیمم ساخت. نحوه کار این روش بگونه ایست که به ازای نامعینی که هزینه سیستم را ماکزیمم می کند، متغیر های کنترلی به نحوی انتخاب شوند تا هزینه سیستم مینیمم گردند.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- تاریخچه خودروی هیبرید

نیاز انسان در بهبود شرایط زندگی روزمره باعث ابداع و اختراع هزاران نوع تجهیزات و لوازم و تکنولوژی های گوناگون در طول تاریخ بشر شده است. آرزوی دیرینه انسان به سفر در روی زمین، آسمان، فضا، دریا و ... باعث گردیده تا بشر نیاز خود را بیش از پیش به وسایل گوناگون حمل و نقل احساس کند. در این بین، خودرو از جمله وسایل حمل و نقل در سراسر جهان می باشد که پیش بینی شده است تعداد آنها در دنیا در سال ۲۰۵۰ از ۲,۵ میلیارد تجاوز خواهد نمود [۱]. چالش های فراوانی که در بین سازندگان خودرو جهت تامین نیازهای مصرف کنندگان خودرو برای افزایش میزان فروش و ارتقا رضایتمندی خریداران از خودروهای تولیدی وجود دارد، آنها را بر آن داشته تا بیش از پیش جهت افزایش امکانات رفاهی مورد نیاز مصرف کننده و کاهش هزینه های مشتریان تلاش نمایند.

نیازهای ضروری مصرف کنندگان شامل هزینه، کارکرد درست، سادگی در رانندگی، ایمنی، فضا، بازدهی و ... می باشد. اکثر مصرف کنندگان در زمان خرید خودرو به مصرف سوخت، عملکرد درست در جاده و سادگی در رانندگی توجه بیشتری دارند. لذا، بهبود در مصرف سوخت علاوه بر اینکه باعث کاهش هزینه های خریداران خودرو می گردد، مهمتر از آن باعث ذخیره نمودن انرژی در سراسر جهان می گردد که در نگاه کلان برای تمامی دولت ها

بسیار حائز اهمیت می باشد. علاوه بر مزایایی که پیرامون کاهش مصرف سوخت بیان گردید، می توان به کاهش میزان آلایندگی نیز اشاره نمود که با کم کردن میزان سوخت مصرفی خودروها میزان آلایندگی های محیطی به صورت چشمگیری کاهش می یابد. بحران کمبود سوخت های فسیلی بویژه نفت در سراسر جهان باعث شده تا سازندگان خودرو، منبع یا منابع انرژی دیگری جهت جایگزین نمودن با سوخت فسیلی و یا طراحی و ابداع روش ها و تکنیک هایی جهت تبدیل دیگر انرژی ها بجای سوخت های فسیلی در خودروها فراهم نمایند [۲]. همچنین تمهیدات دولت ها و اجبار آنها به سازندگان و خریداران خودرو به تولید و استفاده از خودروهایی با میزان آلایندگی پایین تر، بر اهمیت این صنعت افزوده شده است.

پیشرفت در طراحی و ساخت انواع وسایل حمل و نقل و یا پیشرفت در روش ها و تکنیک های کنترلی در خودروها، هر دو باعث دستیابی به کاهش مصرف سوخت خواهد شد، اما تعامل بین کنترل و طراحی منجر به نتایج بهتری می گردد. از طرفی در حالت کلی پیاده سازی طرح های کنترلی جدید و اعمال آنها در خودروها با تغییرات و هزینه های کمتری نسبت به اعمال تغییرات ساختاری خودرو خواهد داشت. برخی از این استراتژی های کنترلی در خودروهای معمولی که از موتورهای احتراقی با سوخت های فسیلی استفاده می کنند عبارتند از:

- بکار گیری جعبه دنده های مناسب،
- تنظیم ورودی های موتور احتراقی نظیر تنظیم سوخت ورودی، استفاده مجدد از گازهای خروجی از موتور و ... .

خودرو های الکتریکی[۱] یکی از روش های جایگزینی خودروهای معمولی می باشد که برخی مزایای آن عبارت است از:

- بازدهی نسبی قابل قبول،
- میزان آلایندگی صوتی بسیار پایین نسبت به خودروهای معمول،
- میزان آلایندگی در حد صفر.

از طرفی عیب بزرگ این خودروها، کوتاهی بازه زمانی و مسافتی که می توان از آن استفاده نمود، می باشد. در این خودروها با توجه به ظرفیت باتری بکار گرفته شده و میزان شارژی که می توان در آن ذخیره نمود، در میزان مسافتی که می توان از این خودروها استفاده نمود، محدودیت وجود خواهد داشت. همچنین میزان زمانی که بایستی جهت شارژ مجدد باتری صرف نمود، باعث پایین آمدن کارایی عمومی این نوع خودروها می شود. بطور کلی از این خودروها می توان در شهرها و مناطقی که فاصله کوتاهی بین مقصدها وجود دارد، استفاده نمود. همچنین هزینه

۱- Electric Vehicles (EVs)

خریداری یک خودروی الکتریکی نسبت به خودروهای معمولی افزایش قابل توجهی دارد که این مساله نیز باعث ایجاد محدودیت در خریداران این نوع وسایل نقلیه می گردد. در حقیقت این نوع خودرو به علت ساختار گشتاوری که دارد (گشتاور بالا در سرعت های پایین جهت شتاب دهی خودرو و گشتاور پایین در زمان سرعت های معمول خودرو)، برای خودروهای در حال حرکت مناسب می باشد.

ویژگی هایی که در بالا اشاره گردید، سازندگان خودرو را متمایل به استفاده ترکیبی از خودروهای الکتریکی و خودروهای معمول ساخت و منجر به طراحی خودروهای هیبرید گردید. خودروهای هیبرید را می توان با استفاده از تکنولوژی های موجود و با استفاده از تغییرات جزیی در منابع انرژی مورد استفاده در خودروهای معمول ساخت.

یک خودروی الکتریکی هیبرید[۱] یکی از متداول ترین خودروی جایگزین برای خودروهای احتراقی می باشد که می تواند نیازهای مصرف کننده را نسبت به خودروهای معمول و با هزینه و مصرف سوخت کمتر برآورده سازد. البته میزان برتری خودروهای هیبرید نسبت به خودروهای احتراقی به استراتژی های کنترلی که در خودروی هیبرید استفاده می شود، بستگی دارد. پیشرفت در موتورهای الکتریکی که در خودروهای هیبرید بکار گرفته می شود، امکان کنترل مناسب این خودروها را فراهم می سازد. تحقیقات نشان داده است که تعامل بین موتور الکتریکی و موتور احتراقی در خودروی هیبرید جهت انتقال توان مصرفی لازم در هر لحظه از زمان به خودرو و نحوه تخصیص این توان در هر لحظه، موثرترین روش در کاهش مصرف سوخت، افزایش بازدهی و در نتیجه کاهش میزان آلایندگی محیطی و هزینه های مصرف کننده می باشد. با توجه به اهمیت کاهش مصرف سوخت در خودروی هیبرید، طراحی و ساخت یک استراتژی کنترل بهینه در این خودروهای بسیار مورد توجه می باشد.

پیشینه خودروی هیبرید بیش از یکصد سال است. جدول ۱-۱ نمونه هایی از اولین خودروهای هیبرید در دنیا می باشد که در اروپا و آمریکا ساخته شدند [۳].

از جمله مسایلی که در اواخر قرن ۱۹ و ابتدای قرن ۲۰ باعث گردید تا صنعت خودروهای هیبرید پیشرفت چندانی نداشته باشد، هزینه ساخت این خودروها بود. اختلاف قیمت خودروهای هیبرید نسبت به خودروهای الکتریکی و خودروهای با سوخت فسیلی در دهه ۱۹۱۰ نسبت به امروزه بسیار بالاتر بود (جدول ۱-۲).

۱- Hybrid Electric Vehicle (HEV)

جدول ۱-۱- نمونه هایی از خودروهای هیرید اولیه

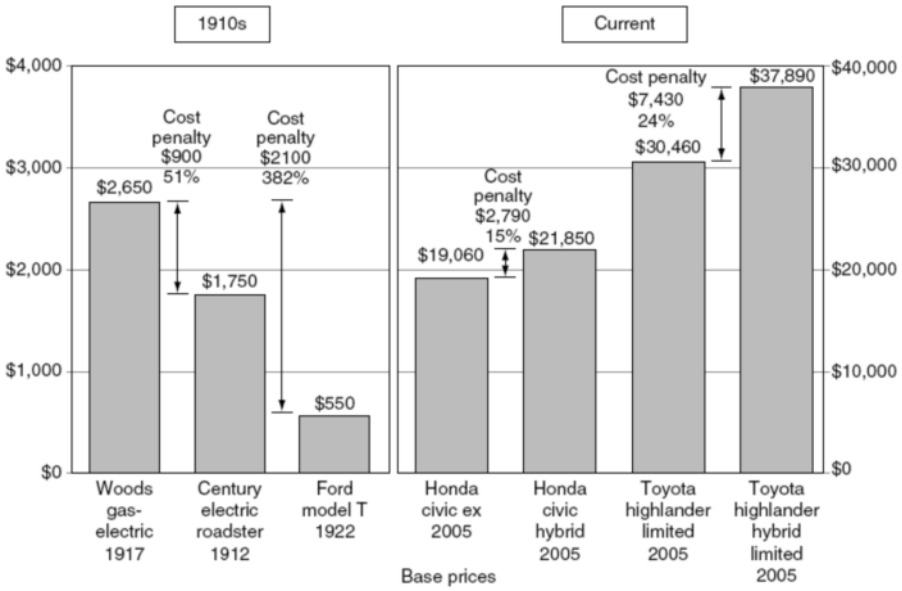
Early Hybrids in Europe and United States

Early Hybrid Vehicles

Manufacturer or Engineer	Country	Year
Pieper	France	1898[a]
Vendovelli & Priestly	France	1899[a]
Jenatzy	?	1901[a]
Krieger	France	1902
Lohner-Porsche	Germany	1903
Auto-Mixie	Germany	1906
Mercedes-Mixie	Germany	1907
Pope	United States	1902[b]
Baker	United States	1917
Woods	United States	1917

[a] Concept vehicle for Paris Automobile Salon.
[b] Prototype caught fire and burned on first test run.

جدول ۱-۲- مقایسه قیمت خودروهای معمول، الکتریکی و هیبرید در ابتدای قرن ۲۰ و ۲۱



جهت کنترل مصرف سوخت خودروهای هیبرید و بررسی و مطالعه روش های کنترلی مختلف، مدل های دینامیکی متفاوتی وجود دارد که بسته به نیاز از آنها استفاده می شود. از جمله این مدل های دینامیکی عبارتند از کنترل مبتنی بر مدل[۱] که جهت طراحی آن به مدل های توجیهی کنترلی پیچیده ای نیاز است. این مدل های کنترلی باید جهت محاسبه محدودیت های کنترلی و طراحی استراتژی های کنترلی مناسب انتخاب شوند. کنترل مصرف سوخت در خودروهای هیبرید به تخصیص توان در حالت پایدار مرتبط بوده در حالی که توانایی رانندگی[۲] مصرف کننده خودرو بطور معمول در بازه های فرکانسی پایینی قرار دارد. جهت محاسبه میزان سوخت مصرفی در هر لحظه

۱- Model Based Control

۲- Driveability

از زمان در یک خودروی هیبرید می توان از یک مدل شبه استاتیکی[۱] در طراحی کنترل کننده استفاده نمود. در شبیه سازی ها نشان داده می شود که استفاده از این مدل در کنترل بهینه سوخت در خودروی هیبرید بسیار موثر است. داشتن میزان دقیق تابع توان مورد نیاز خودرو در هر لحظه از زمان جهت کنترل بهینه مصرف سوخت از اهمیت بالایی برخوردار است.

کنترل بهینه مصرف سوخت در خودروی هیبرید به سه حالت تقسیم بندی می شود.

- کنترل سوخت به ازای توان مورد نیاز ثابت و معین،
- کنترل سوخت به ازای توان مورد نیاز متغیر با زمان،
- کنترل سوخت به ازای توان مورد نیاز نامشخص متغیر با زمان با پیش بینی هایی با بازه زمانی کوتاه.

نامعینی در سیستم های واقعی نیز از جمله مواردی است که در حل مسائل عملی در نظر گرفته می شود. در این رساله سعی شده است تا با استفاده از قضیه کنترل بهینه و روش های عددی نوین نظیر روش مستقیم[۲] و روش توابع هیبرید[۳] مساله کنترل مصرف سوخت را در دو حالت زیر حل نماییم:

- توان مورد نیاز خودرو مشخص و متغیر با زمان است و هیچ نامعینی در سیستم وجود ندارد.
- توان مورد نیاز خودرو مشخص و متغیر با زمان است و نامعینی در شرایط اولیه سیستم و یا در دینامیک آن وجود دارد.

خودروی هیبرید، خودرویی است که حداقل از دو منبع انرژی نظیر سوخت فسیلی، هیدروژن، انرژی الکتریکی استفاده می کند. در این رساله منظور از خودروی هیبرید، خودرویی است که متشکل از سوخت فسیلی و انرژی الکتریکی می باشد. موتور الکتریکی در خودروی هیبرید به موتور احتراقی کمک می نماید تا جهت تکمیل توان مورد نیاز سیستم در زمان های مختلف در طول مسیر از انرژی ذخیره شده در باتری ها استفاده کند. همچنین در زمانی که توان مکانیکی مازاد در سیستم وجود دارد (به عنوان نمونه هنگام کم کردن سرعت)، از آن جهت شارژ مجدد باتری استفاده شود. این هماهنگی بین انرژی الکتریکی و سوخت فسیلی در خودروی هیبرید باعث کاهش اندازه موتور احتراقی جهت کارکردن خودرو در ناحیه بهینه در بسیاری از شرایط عملکرد خودرو می گردد. مضاف بر این، خودروی هیبرید قادر است تا از سیستم ترمز جهت شارژ مجدد[۴] منابع ذخیره سازی توان الکتریکی، تولید توان الکتریکی در زمان حرکت و توانایی های قدرت الکتریکی محدود را فراهم سازد. اما این انعطاف پذیری و تنوع در

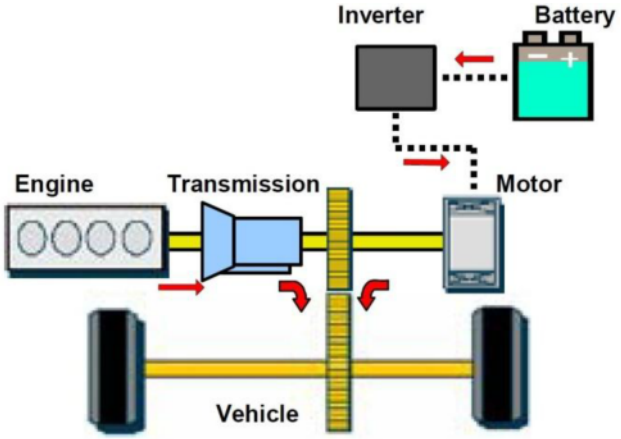
۱- Quasi-static model
۲- Direct Method
۳-Hybrid Functions
۴- Regenerative Braking

ساختار خودرو باعث افزایش پیچیدگی طراحی خودروی هیبرید و کنترل آن می شود. البته وجود توانایی در انعطاف پذیری خودروی هیبرید است که می توان مصرف سوخت و عملکرد خودرو را بهینه نمود.

سه نوع خودروی هیبرید متناسب با ساختار توان بکار گرفته شده در خودروی هیبرید وجود دارد:

- **خودروی هیبرید موازی:**

در این ساختار مطابق شکل ۱-۱ موتور احتراقی و موتور الکتریکی می توانند به تنهایی و یا با هم کار کنند به نحوی که موتور الکتریکی می تواند به صورت موتور یا ژنراتور عمل نماید. اتصال مکانیکی بین این دو مبدل انرژی به گونه ای می باشد که از گسستگی بین سرعت موتور احتراقی با سرعت خودرو ممانعت کند. اگرچه با استفاده از این روش امکان اینکه خودرو دائما در ناحیه بهینه خود کار کند از دست می رود، ولی خودروی هیبرید با ساختار موازی بطور کلی بیشترین بازدهی را نسبت به سایر حالت های خودروی هیبرید دارد. خودروی هیبرید در این حالت حتی زمانی که باتری کاملا دشارژ شده باشد نیز قابل استفاده می باشد (البته در صورتیکه سوخت فسیلی در منبع ذخیره خودرو موجود باشد).

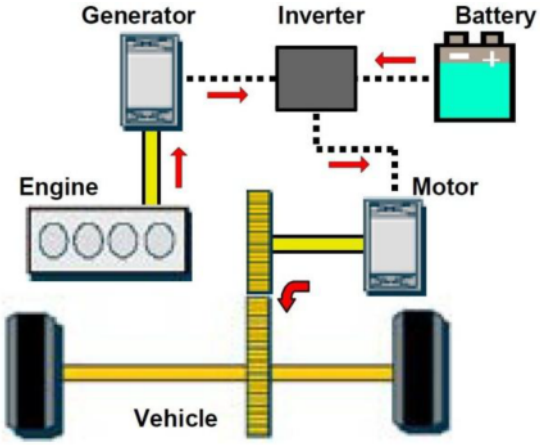


شکل ۱-۱- بلوک دیاگرام خودروی هیبرید موازی

- **خودروی هیبرید سری:**

در خودروی هیبرید سری همانند شکل ۱-۲ موتور احتراقی یا برای شارژ کردن باتری استفاده می شود و یا جهت تغذیه مدارات مربوط به کم کردن بار باتری بکار گرفته می شود. در این حالت موتور مستقیما خودرو را به حرکت در می آورد، که در نتیجه جهت تامین حداکثر توان لازم در خودرو از اندازه بزرگتری نسبت به حالت مشابه در انواع دیگر خودروی هیبرید برخوردار است. موتور احتراقی و ژنراتور نیز بایستی به اندازه کافی جهت دستیابی به توان مورد نیاز خودرو بزرگ باشد مگر اینکه از آن تنها در مسیرهای کوتاه استفاده شود. استفاده از موتورهای الکتریکی بزرگ علاوه بر اینکه هزینه های ساخت خودروی هیبرید را افزایش می دهد، باعث افزایش وزن خودرو نیز می شود که هر دو از معایب استفاده از این نوع خودروی هیبرید می باشد. تلفات مبدل های انرژی بکار گرفته

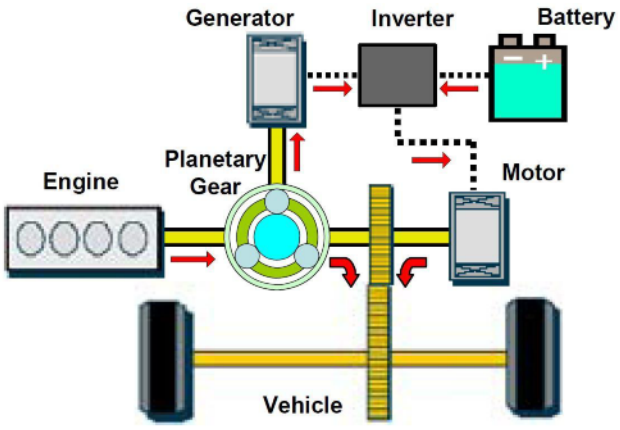
شده در خودروی هیبرید نوع سری حتی با توجه به اینکه در این نوع خودرو، موتور احتراقی بطور مستقیم با حرکت خودرو در ارتباط نیست و باعث گردیده موتور بتواند در ناحیه بهینه توان کار کند، منجر به کاهش کلی بازدهی خودرو می گردد.



شکل ۱-۲- بلوک دیاگرام خودروی هیبرید سری

- **خودروی هیبرید سری-موازی:**

این نمونه خودروی هیبرید (شکل ۱-۳)، ترکیبی از ویژگی های مثبت هر دو نوع خودروی هیبرید موازی و سری می باشد. جعبه دنده موجود در این نوع خودرو به عنوان متغیر انتقالی الکتریکی کنترل شده به نحوی عمل می کند که ارتباط بین موتور احتراقی، موتور الکتریکی، ژنراتور و دیفرانسیل خودرو را فراهم سازد. درنتیجه موتور احتراقی در ناحیه بهینه کار می کند و کل سیستم می تواند بازدهی بالا، توانایی رانندگی خوب و مصرف سوخت پایینی داشته باشد. پیچیدگی این نمونه منجر به صرف هزینه های بالایی می گردد که باعث می شود تا به سختی به فواید قابل قبول ذکر شده به ازای هزینه های پایین دست یافت. انواع خودروهای هیبرید امکان استفاده از موتورهای احتراقی با اندازه های کوچک تر از حالت معمولی را می دهد و همچنین امکان بازیابی انرژی جنبشی موجود در زمان ترمز را که معمولا به صورت انرژی حرارتی تلف می شود را را فراهم می سازد.



شکل ۱-۳- بلوک دیاگرام خودروی هیبرید سری- موازی

وسایل ذخیره کردن انرژی در خودروهای هیبرید می تواند به صورت الکتریکی نظیر باتری ها و ابر خازن ها ویا به صورت مکانیکی نظیر چرخ هرزگرد[۱] باشد. یک نمونه دیگر از تقسیم بندی های انواع خودروی هیبرید نیز بر اساس عملکرد باتری می باشد. در حالت ذخیره کردن شارژ باتری در خودروی هیبرید، وضعیت شارژ باتری[۲] در رنج های مشخصی استفاده می شود، در حالیکه تخلیه شارژ خودروی هیبرید ممکن است باتری را در مینیمم سطح دشارژ کند و آنگاه با استفاده از موتور احتراقی یا در حالت ترمز شارژ گردد. در نتیجه از آنجا که شارژ مجدد راحت و سریع برای تخلیه شارژ باتری با توجه به شرایط موجود دشوار است، نگهداری شارژ باتری مناسب تر خواهد بود.

در خودروی هیبرید، مهمترین فاکتور در دستیابی به کاهش مصرف سوخت و آلایندگی خودرو به ویژگی های کنترلی آن بستگی دارد. بطور کلی کنترل در خودروی هیبرید در دو سطح انجام می شود:

- کنترل نظارتی[۳]
- کنترل جزء به جزء (ترکیبی)[۴]

عملیات مربوط به کنترل نظارتی بر پایه یک واحد مدیریت انرژی[۵]، مربوط به درخواست تقسیم توان[۶] بین سوخت شیمیایی و منبع انرژی الکتریکی (باتری یا ابر خازن) می باشد. از طرفی کنترل کننده های ترکیبی سطح پایین، دستورات لازم را از کنترل کننده نظارتی دریافت و ساختار کنترلی لازم را جهت هر محرک فراهم می سازند. آنچه که در این رساله بررسی می شود، طراحی و پیاده سازی یک کنترل کننده نظارتی در خودروهای هیبرید می باشد.

طراحی مدل پایه خودرو برای مهندسین کنترل در بسیاری از زمینه ها کاربرد داشته و این ساختار نیازمند به یک مدل کنترل گرا[۷] دارد. مدل دینامیکی خودروی هیبرید به موارد ذیل طبقه بندی می شود:

- استاتیکی یا شبه استاتیکی (مرتبه صفر)
- مدل دینامیکی فرکانس پایین
- مدل دینامیکی فرکانس بالا
- مدل توزیع شده بر اساس مقیاس زمانی[۸]

منابعی که جهت فراهم کردن این مدل ها مورد نیاز است، از داده های آزمایشی، فرمولها و معادلات تجربی یا معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی مرتبه اول بدست می آیند. مدلهای مرتبه پایین خودرو شامل معادلات دیفرانسیل

۱- Flywheel
۲- State of Charge (SOC)
۳-Supervisory control
۴- Component control
۵-Energy management
۶- Splitting power request
۷-Control-oriented model
۸- Distributed model in time scale

می باشند و اغلب برای حل مسایل کنترل بکار گرفته می شوند، در حالی که مدلهای مرتبه صفر نظیر مدل انرژی، محاسبات جریان انرژی در رانندگی از روابط جبری استفاده می کنند. هر دو مدل مرتبه پایین و مرتبه صفر در خودروی هیبرید را می توان توسط مشتقات جزئی مرتبه اول به همراه روابط تجربی یا تکنیکهای شناسایی سیستم بدست آورد. مدل سیلندر موتور احتراقی [۴ و ۵]، مدل موتور الکتریکی با پنج متغیر حالت [۶]، مدل باتری دینامیکی مرتبه بالا [۷]، مدل مبدل گشتاور (TC)[۱] تابلر و هروات [۸] و مدل CVT [۲] [۹] به عنوان مدل های دینامیکی خودروی هیبرید فرکانس بالا می باشند. این مدل های دینامیکی خودروی هیبرید از مرتبه های بالا هستند و برای طراحی کنترل کننده های استاندارد بسیار پیچیده و در برخی موارد با توجه به امکانات و تجهیزات موجود غیر قابل استفاده می باشند [۱۰]. مهندسین کنترل خودروی هیبرید می توانند بر اساس مدل های دینامیکی ساده شده شبه استاتیکی، فرکانس پایین و یا مدل های دینامیکی مرتبه پایین بدون ایجاد خدشه ای در طراحی و کنترل سیستم واقعی، کنترل کننده های لازم را طراحی و پیاده سازی کنند [۹و ۱۱-۱۵].

بهترین مدل در طراحی کنترل کننده، مدلی می باشد که تمامی پارامترهای ضروری در خودروی هیبرید را با کمترین پیچیدگی و هزینه ارائه دهد. با توجه به اینکه در عمل نامعینی در مدل و اغتشاش در سیستم های دینامیکی خودروی هیبرید وجود دارد، هیچ مدل دقیقی را نمی توان تهیه نمود. در هر صورت اگر یک مدل دینامیکی رفتارهای فیزیکی سیستم را با دقت قابل قبولی فراهم آورد، می توان از آن جهت کنترل سیستم استفاده نمود. یک مدل دینامیکی شبه استاتیکی می تواند نیازهای سیستم را جهت تحلیل و بهینه سازی سوخت و بازدهی خودروی هیبرید فراهم آورد [۱۶-۱۸]. البته استفاده از این مدل ها جهت محاسبه قابلیت رانندگی چندان مناسب نیست و بایستی از مدل دینامیکی فرکانس پایین جهت بهینه سازی قابلیت رانندگی استفاده نمود. از طرفی استفاده از مدل دینامیکی فرکانس پایین جهت کنترل بهینه سوخت و کارایی خودروی هیبرید باعث افزایش پیچیدگی مساله می گردد و ممکن است منجر به یک مساله غیر قابل حل شود.

کنترل سوخت خودرو بر مبنای استراتژی کنترل نظارتی که می توان آنرا به صورت کلی بهینه نمود، تعریف می شود. روش های کنترلی نظیر برنامه نویسی دینامیکی[۳] [۱۹]. در حالت کلی بهینه سازی سراسری را می توان توسط بهینه سازی محلی نظیر استراتژی مینیمم کردن مصرف سوخت معادل[۴] [۲۰] تقریب زد. از طرفی می توان از روش

۱-Torque Converter
۲- Continuously Variable Transmission
۳-Dynamic programming
۴- Equivalent Consumption Minimization Strategy
۵-Rule-based controller
۶- Fuzzy logic
۷-Neural networks

های کنترلی نوین و هوشمند همانند کنترل کننده هایی بر اساس قانون[۵] [۲۱]، منطق فازی[۶] [۲۲] و شبکه های عصبی[۷] [۲۳] و ... استفاده نمود.

در هر خودروی واقعی، اطلاعات و دانش از شرایط رانندگی در آینده همیشه محدود بوده و در برخی مواقع موجود نمی باشد که در نتیجه داشتن یک حل بهینه سراسری عملا غیر ممکن است. با این حال، حالتی که تمامی شرایط رانندگی از پیش مشخص و دانسته باشند، موضوعی است که بسیار مورد توجه محققان می باشد. با توجه به شرایط ذکر شده، مدیریت انرژی خودروی هیبرید را می توان به صورت ذیل حل نمود:

حل مساله کنترل بهینه با دانستن شرایط آینده (دانستن توان مورد نیاز خودرو در هر لحظه از زمان) و سپس حل مساله کنترل بهینه به ازای شرایط رانندگی پیش بینی شده محدود.

در این رساله همانگونه که اشاره گردید، هدف، تعیین یک استراتژی کنترل بهینه جهت دستیابی به حداقل سوخت با توجه به میزان توان مورد نیاز خودروی هیبرید و شرایط سیستم می باشد. جهت نیل به این هدف، ابتدا بایستی یک مدل جهت پیاده سازی کنترل کننده برای یک نمونه خودروی هیبرید تهیه نمود و سپس با استفاده از روش های کنترلی، مصرف سوخت و میزان آلایندگی را کاهش داد. همانگونه که بیان گردید جهت کنترل مصرف سوخت، مناسب ترین نوع خودروی هیبرید، خودروی هیبرید از نوع موازی می باشد. در نتیجه در این رساله از یک مدل مناسب جهت خودروی هیبرید موازی استفاده خواهد شد. یک کنترل کننده نظارتی به مدیریت مصرف سوخت وابسته بوده و بایستی جهت کاهش میزان سوخت از یک کنترل کننده نظارتی به همراه شرایط و قیود موجود استفاده نمود. طراحی این نوع کنترل کننده نظارتی برای خودروهای هیبرید به ازای توان مورد نیاز خودرو در آینده کاربرد دارد و همچنین جهت استفاده در خودروهایی که در بازه های زمانی کوتاهی میزان توان مورد نیاز آنها قابل پیش بینی است، مناسب می باشد.

۱-۲- پیشینه و کارهای انجام شده

۱-۲-۱- مدلسازی و شبیه سازی

بسیاری از طراحان صنعتی بویژه در صنایع خودروسازی از مدل های توسعه یافته گوناگونی جهت رسیدن به اهداف کنترلی خود استفاده می کنند. استفاده از مدلی که شرایط واقعی خودروی هیبرید را به درستی فراهم سازد و به طراحان اجازه دهد تا روش های کنترلی خود را بجای استفاده در محیط عملی، بتوانند به راحتی به صورت مجازی شبیه سازی کنند، بسیار حائز اهمیت می باشد. استفاده از شبیه سازی های درست و دقیق، طراحی و پیاده سازی روش های کنترلی را تسریع کرده و از صرف هزینه هایی که در عمل رخ می دهد جلوگیری می کند. البته نتایج عملی نیز