

بهینه سازی مصرف سوخت در یک خودروی هیبریدی موازی دارای سیستم انتقال قدرت CVT

مجتبی دری^۱، امیرحسین شامخی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ mojtaba.dorri@gmail.com
^۲ استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ shamekhi@kntu.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدلی از یک خودروی هیبریدی موازی در نظر گرفته شده و یک استراتژی کنترل جدید به نام استراتژی کنترل CVT^۱، به منظور مدیریت موثر تقسیم توان بین موتورهای احتراقی و الکتریکی، با هدف کاهش مصرف سوخت، طراحی شده است. جعبه‌دنده CVT (با نسبت‌دنده پیوسته متغیر) نقشی اساسی در کمک به موتور احتراقی برای کارکرد در نقاط بهینه خود دارد.

کنترلر طراحی شده چهار وضعیت برای حرکت خودرو در نظر می‌گیرد سپس توان درخواستی از طرف راننده را به عنوان ورودی پذیرفته و با توجه به وضعیت شارژ باتری^۲، بهترین وضعیت حرکت را از بین حالات موجود انتخاب می‌کند. در ادامه، کنترلر با مراجعه به منحنی‌های بهینه محاسبه شده برای موتور احتراقی و الکتریکی سرعت بهینه موتور مورد نظر و نسبت‌دنده را طوری تعیین می‌کند تا در هر زمان خودرو بالاترین راندمان مصرف سوخت را داشته و از فدا شدن پارامترهای عملکردی و افزایش بیش از حد آلایندها جلوگیری شود. کنترلر تا حد امکان از بازایی نیروی ترمزی نیز استفاده می‌کند. در بخشی از کنترلر CVT برای تشخیص وضعیت حرکتی و محاسبه توان اضافی موتور احتراقی (جهت شارژ باتری) از منطق فازی استفاده شده است.

نتایج حاصل از اعمال کنترلر CVT روی سیکل‌های رانندگی FTP امریکا، NEDC اروپا و 1015 ژاپن محاسبه شده است. این نتایج با نتایج حاصل از اعمال کنترلر پیش‌فرض نرم‌افزار Advisor^۳ مقایسه شده و پارامترهای کنترلر فازی برای دستیابی به نتایج مطلوب‌تر توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند.

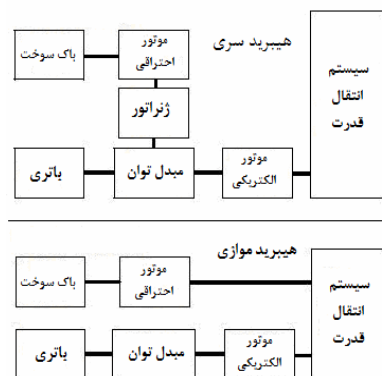
کلمات کلیدی: استراتژی کنترل، بهینه‌سازی، جعبه‌دنده CVT، خودروی هیبریدی موازی، کاهش مصرف سوخت.

مقدمه

آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی زندگی بشر امروزی مطرح است. در این میان خودروها، به‌عنوان یکی از مصرف‌کنندگان عمده سوخت و تولیدکننده آلایندگی، بخشی جدایی‌ناپذیر از حمل و نقل و پیشرفت

جوامع را تشکیل می‌دهند که به راحتی قابل صرف نظر نیستند. سال‌هاست خودروهای هیبریدی به عنوان یک راه حل مناسب برای کاهش مصرف سوخت و آلایندگی مطرح می‌باشند.

دو پیکربندی سری و موازی (شکل ۱) در خودروهای هیبریدی متداول‌تر می‌باشند [۱]. در پیکربندی سری سرعت موتور احتراقی مستقل از سرعت چرخ‌ها تعیین می‌شود، بنابراین موتور احتراقی می‌تواند همواره روی منحنی حداکثر راندمان خود کار کند، با این وجود اتلاف انرژی در اثر تبدیلات انرژی مکانیکی به الکتریکی و بالعکس باعث کاهش راندمان کلی سیستم می‌شود. از سوی دیگر در پیکربندی موازی اتلاف در اثر تبدیل انرژی کمتر بوده ولی به دلیل غیرقابل کنترل بودن سرعت موتور احتراقی (که توسط سرعت چرخ و نسبت‌دنده تعیین می‌شود)، راندمان عملکرد آن پایین است. در این مقاله به منظور بهره‌مندی از مزایای هر دو پیکربندی سری و موازی، از یک جعبه‌دنده CVT استفاده شده است.



شکل ۱: پیکربندی‌های سری و موازی [۱]

در خودروهای هیبریدی برای افزایش راندمان، لازم است علاوه بر بهینه‌سازی اجزا ساختاری خودرو به استراتژی مدیریت انرژی نیز پرداخته شود [۲]. آنچه در یک خودروی هیبریدی بسیار حائز اهمیت است چگونگی تقسیم توان بین اجزا اصلی زنجیره توان است تا خودرو در هر لحظه بالاترین راندمان را داشته باشد. این شیوه تقسیم توان تحت عنوان استراتژی مدیریت انرژی و یا استراتژی کنترل خودروی هیبریدی شناخته می‌شود.

در مطالعه حاضر به منظور کاهش مصرف سوخت از استراتژی جدیدی به نام استراتژی کنترل جعبه‌دنده CVT استفاده شده است.

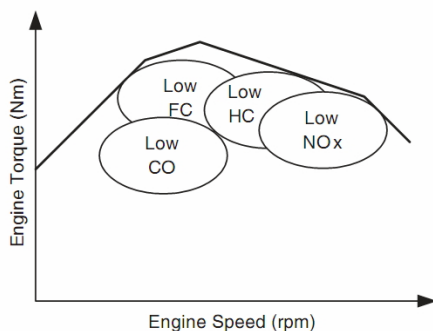
^۱ Continuously Variable Transmission (CVT)
^۲ State Of Charge (SOC)
^۳ Advanced Vehicle Simulator

احتراقی است اما چون تنها موتور احتراقی هدف قرار می‌گیرد از پتانسیل خودروی هیبریدی به طور کامل استفاده نمی‌شود. روش دوم عملکرد لحظه‌ای سیستم هیبریدی را بهینه‌سازی می‌کند. این کار با بهینه‌سازی لحظه‌ای مصرف سوخت و یا تولید آلاینده‌ها انجام می‌شود. روش دیگر بهینه‌سازی مصرف سوخت کل و یا تولید آلاینده‌گی کل (و یا هر دو) روی یک سیکل رانندگی خاص است [۷].

در این مقاله اهداف در نظر گرفته شده برای کنترلر خودروی هیبریدی عبارتند از: ۱- حفظ وضعیت شارژ باتری در پایان سیکل رانندگی، ۲- حفظ پارامترهای عملکردی خودرو در یک شرایط حداقل، تا از برآورده شدن نیاز راننده در هر شرایطی اطمینان حاصل کنیم. برای این هدف قیود مطرح شده در قرارداد PNGV^۶ در نظر گرفته شده است (جدول ۱). ۳- کاهش مصرف سوخت در شرایطی که آلاینده‌گی افزایش نیابد. می‌دانیم مصرف سوخت الزاماً با کاهش آلاینده‌گی همراه نیست، بنابراین برای جلوگیری از قربانی شدن آلاینده‌ها باید مصالحه‌ای بین کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها ایجاد شود. شکل ۲ مکان هندسی نقاط عملکردی یک نمونه موتور اشتعال جرقه‌ای را نشان می‌دهد [۴].

جدول ۱: شرایط PNGV برای عملکرد خودروهای سواری [۳]

| | |
|-------------------|--|
| کمتر از ۱۲ ثانیه | ۰ - ۹۷ km/h |
| کمتر از ۲۳ ثانیه | ۰ - ۱۳۷ km/h |
| کمتر از ۵٫۳ ثانیه | ۶۴ - ۹۷ km/h |
| بیش از ۴۲٫۷ متر | مسافت طی شده در ۵ ثانیه |
| بیش از ۵ | حداکثر شتاب (m/s ²) |
| بیش از ۶٫۵٪ | شیب‌روی در سرعت ۸۹ km/h (به مدت ۲۰ دقیقه با ۲۷۲ kg بار اضافی) |
| بیش از ۱۶۱ | حداکثر سرعت (km/h) |



شکل ۲: مکان هندسی نقاط عملکردی یک موتور اشتعال جرقه‌ای [۴]

بدین منظور تابع هزینه زیر، به عنوان رابطه‌ای بین مصرف سوخت و آلاینده‌ها تعریف شده است:

$$CostFcn = \frac{1}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \left(w_1 \frac{FC}{FC} + w_2 \frac{HC}{HC} + w_3 \frac{CO}{CO} + w_4 \frac{NOx}{NOx} \right) \quad (1)$$

Partnership for New Generation Vehicles^۶

در این استراتژی هدف تعیین بهترین نسبت‌دنده در هر زمان با توجه به شرایط درخواستی از طرف راننده و مسیر است. برای خودرو چهار وضعیت حرکتی تعریف شده است و کنترلر ابتدا وضعیت مناسب حرکتی را انتخاب کرده سپس به تعیین نسبت‌دنده بهینه می‌پردازد. در بخشی از کنترلر CVT، برای تعیین توان اضافی موتور احتراقی جهت شارژ باتری از یک کنترلر فازی استفاده شده است. در کارهای بسیاری (۷-۳) به سودمند بودن استفاده از روش کنترل فازی در طراحی استراتژی کنترلی خودروی هیبریدی اشاره شده است.

چاتن^۱ و همکارانش یک استراتژی کنترلر توان برای خودروی هیبرید موازی طراحی کرده‌اند. هدف اصلی این استراتژی بهینه‌سازی مصرف سوخت توسط بهینه‌سازی همزمان راندمان موتور احتراقی، موتور الکتریکی و باتری است. کنترلرهای جداگانه‌ای نیز برای بهینه‌سازی ترمزگیری و تعویض دنده در نظر گرفته شده است [۳].

پورصمد و منتظری با طراحی و بهینه‌سازی یک کنترلر فازی به کنترل عملکرد موتور احتراقی پرداخته‌اند. برای تنظیم بهینه کنترلر فازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در نهایت مصرف سوخت و تولید آلاینده‌گی روی سیکل‌های رانندگی مورد نظر کاهش یافته و پارامترهای عملکردی نیز تا حد امکان بهبود یافته‌اند [۴].

خیر^۲ و همکارانش یک کنترلر فازی برای خودروی هیبریدی موازی، برای ایجاد مصالحه^۲ در کاهش همزمان مصرف سوخت و آلاینده NO_x طراحی کرده‌اند [۷].

موداک^۴ و سان^۵ طرحی برای ساخت خودروی هیبریدی به همراه جعبه‌دنده CVT ارائه داده‌اند. در این طرح شارژ باتری‌ها از طریق یک شبکه الکتریکی در خارج خودرو بوده و شارژ توسط موتور احتراقی، تنها در مواقع ضروری انجام می‌پذیرد. این خودرو بیشتر به صورت الکتریکی عمل کرده و از نظر مصرف سوخت و تولید آلاینده‌گی در سطح بسیار مناسبی قرار دارد [۸].

استراتژی کنترلر خودروی هیبریدی

ایده استفاده از خودروهای هیبریدی بسیار قدیمی است و به حدود ۱۰۰ سال پیش بازمی‌گردد. در حدود سال ۱۹۱۵ چندین خودروی هیبریدی در پیکربندی موازی طراحی و در تعداد محدود ساخته شد [۸]. در خودروهای هیبریدی حالت‌های دیگری مانند پیکربندی سری-موازی و پیکربندی مرکب نیز قابل تصور است [۱].

در حالت موازی برای بدست آوردن عملکرد مشابه حالت سری، به موتور احتراقی و الکتریکی کوچکتری احتیاج است بنابراین پیکربندی موازی برای خودروهای سواری و پیکربندی سری برای خودروهای سنگین مناسب‌تر است [۴].

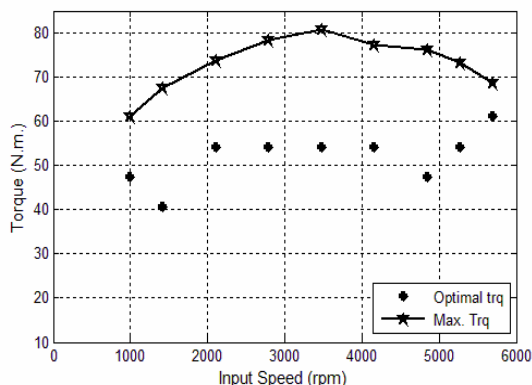
چندین روش برای طراحی استراتژی کنترلی در خودروهای هیبریدی به کار رفته است. روش اول بهینه‌سازی عملکرد موتور

Schouten^۱
Kheir^۲
Trade-off^۳
Modak^۴
Sane^۵

در این رابطه:

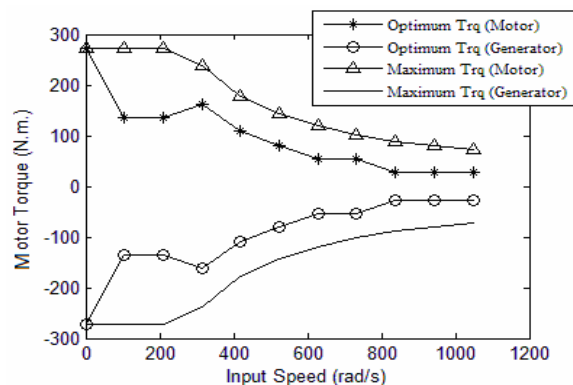
W_1 ها ضرایب وزنی اختصاص داده شده به هر متغیر W_1 ، W_2 و W_3 به ترتیب مقدار مصرف سوخت و آلاینده‌ها CO ، HC ، NO_x (بر حسب g/kWh) و پارامترهای باردار، مقادیر هدف برای نرمالیزه کردن هر متغیر است.

در این مقاله برای پارامترهای هدف، از میانگین مقادیر نداشت موتور احتراقی استفاده شده است. از آنجا که هدف کاهش مصرف سوخت است، ضریب وزنی W_1 برابر ۲ و ضریب وزنی آلاینده‌ها ۱ در نظر گرفته شده است. تابع هزینه در هر سرعت مشخص و برای تمام گشتاورهای موجود در نداشت موتور احتراقی محاسبه و گشتاور متناظر با مینیمم تابع هزینه در هر سرعتی محاسبه و منحنی حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: گشتاور ماکزیمم و گشتاور بهینه (حاصل از اعمال تابع هزینه)

در شکل ۴ منحنی گشتاور بهینه موتور الکتریکی، برای داشتن بالاترین راندمان در هر دور محاسبه و ترسیم شده است.



شکل ۴: گشتاور ماکزیمم و بهینه موتور الکتریکی

در هر دور مشخص، با ضرب سرعت در گشتاور، توان معادل با آن سرعت محاسبه می‌شود.

سیکل‌های رانندگی

به منظور مقایسه و نیز استانداردسازی مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ی خودروی مدل شده و نیز بررسی تاثیر کنترلر CVT از یک

سیکل امریکایی (FTP)، یک سیکل اروپایی (NEDC) و یک سیکل ژاپنی (1015) استفاده شده است. سیکل رانندگی نموداری از تغییرات سرعت برحسب زمان است که نمایانگر شرایط ترافیکی و رفتار راننده در یک ناحیه خاص جغرافیایی می‌باشد [۴]. مشخصات سیکل‌های هدف در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲: مشخصات سیکل‌های رانندگی هدف

| سیکل رانندگی | FTP | NEDC | 1015 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| زمان (s) | ۲۴۷۷ | ۱۱۸۴ | ۶۶۰ |
| مسافت (km) | ۱۷٫۷۷ | ۱۰٫۹۳ | ۴٫۱۶ |
| حداکثر سرعت (km/h) | ۹۱٫۲۵ | ۱۲۰ | ۶۹٫۹۷ |
| متوسط سرعت (km/h) | ۲۵٫۸۲ | ۳۳٫۲۱ | ۲۲٫۶۸ |
| حداکثر شتاب (m/s^2) | ۱٫۴۸ | ۱٫۰۶ | ۰٫۷۹ |
| متوسط شتاب (m/s^2) | ۰٫۵۱ | ۰٫۵۴ | ۰٫۵۷ |
| زمان حالت درجا ^۲ (s) | ۳۶۱ | ۲۹۸ | ۲۱۵ |
| تعداد توقف‌ها | ۲۲ | ۱۳ | ۷ |

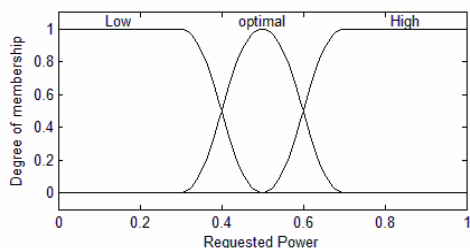
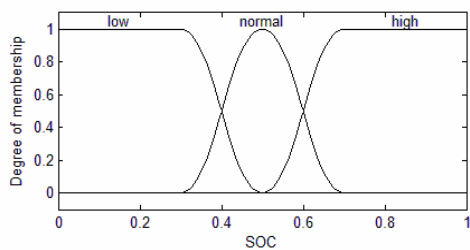
استراتژی کنترل جعبه‌دنده CVT

جعبه‌دنده‌های CVT در مقایسه با جعبه‌دنده‌های چرخنده‌ای دارای راندمان پایین‌تری می‌باشند اما قادرند مصرف سوخت را به طور چشمگیری کاهش دهند [۹]. کنترلر CVT عموماً به صورت استاتیکی انجام می‌شود بدین معنا که برای هر توان درخواستی، سرعت بهینه کارکرد موتور احتراقی محاسبه شده و سعی می‌شود موتور احتراقی در تمام لحظات نزدیک این خط بهینه عمل کند (این جعبه‌دنده‌ها دارای بینهایت نسبت‌دنده بین دو حد بالا و پایین خود می‌باشند).

وظیفه کنترلر CVT انتخاب بهترین نسبت‌دنده از میان بینهایت نسبت‌دنده موجود برای جعبه‌دنده به منظور دستیابی به اهداف تعیین شده در بخش‌های قبل است. وضعیت‌های تعریف شده برای حرکت خودرو عبارتند از: ۱- خودرو در حالت ترمزگیری بوده و بازیابی نیروی ترمزی انجام می‌شود. ۲- در شرایطی که توان درخواستی برای حرکت خودرو اندک باشد و وضعیت شارژ باتری مناسب باشد، از موتور الکتریکی به تنهایی برای حرکت خودرو استفاده می‌شود. ۳- موتور احتراقی به تنهایی کار می‌کند. در این وضعیت در صورت نیاز به شارژ باتری موتور احتراقی توان بیشتری تولید کرده و این توان اضافی در موتور الکتریکی (ژنراتور) برای شارژ باتری‌ها به کار گرفته می‌شود. ۴- موتور الکتریکی و موتور احتراقی همزمان برای رانش خودرو کار می‌کنند.

پارامترهای ورودی کنترلر CVT برای تعیین وضعیت حرکتی، توان درخواستی از طرف راننده و وضعیت شارژ باتری می‌باشند. توان درخواستی از طرف راننده متناظر با توان لازم برای پیمایش سیکل رانندگی است. کنترلر ابتدا توان درخواستی را از نظر علامت (مثبت

US EPA Federal Test Procedure
New European Drive Cycle
Idle Time

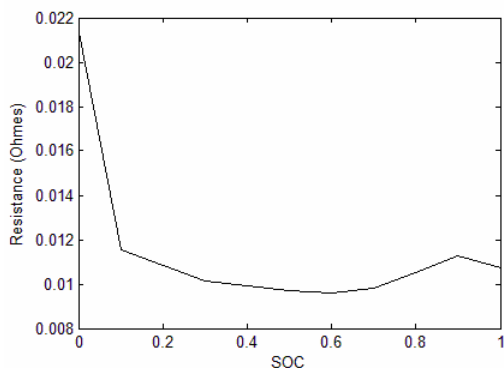


شکل ۵: توابع عضویت وضعیت شارژ باتری و توان درخواستی

با توجه به اینکه خروجی کنترلی فازای توان تولیدی موتور احتراقی است بنابراین توابع عضویت مربوط به آن دقیقاً شبیه توابع عضویت توان درخواستی (شکل ۵) در نظر گرفته شده است [۴].

کنترلر ابتدا توان درخواستی را با توان‌های بهینه و ماکزیمم موتور احتراقی در سرعت تعیین شده مقایسه کرده و آن را بین صفر و ۱ نرمال می‌کند. با این کار با تغییر سرعت موتور احتراقی، همواره، توان صفر روی نقطه صفر، توان ماکزیمم روی نقطه ۱ و توان بهینه روی نقطه ۰/۵ قرار خواهد گرفت، بنابراین توان بهینه در تمام سرعت‌ها و با تمام توابع عضویت ورودی، همواره روی نقطه میانی ۰/۵ نرمال می‌شود و مفهوم بهینه بودن آن حفظ می‌شود (در مراحل بعد برای بهینه‌سازی نتایج، به تغییر توابع عضویت مربوط به توان و SOC می‌پردازیم، در آنجا نیز برای حفظ یکپارچگی نتایج لازم است موقعیت توان صفر، بهینه و ماکزیمم ثابت باشد).

عملیات نرمال‌سازی برای SOC نیز انجام گرفته است. در این قسمت حد بالایی و پایینی محدوده‌ای که باتری در آن کمترین مقاومت در برابر شارژ و دشارژ را دارد (۰/۷ و ۰/۵)، به ترتیب، روی نقطه ۱ و صفر نرمال شده و نقطه میانی بیانگر کمترین مقاومت (۰/۶) خواهد بود. منحنی شارژ و دشارژ باتری مدل‌شده در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶: مقاومت باتری در برابر شارژ و دشارژ (نمودارها برهم منطبق شده‌اند)

یا منفی بودن) بررسی کرده و سپس آن را با توان حداکثر و بهینه موتور احتراقی در سرعت تعیین شده مقایسه می‌کند. حاصل این بررسی به سه دسته تقسیم می‌شود:

دسته ۱: توان درخواستی منفی است. کنترلی CVT وضعیت حرکتی ۱ را انتخاب می‌کند تا در صورت نیاز به شارژ از حداکثر بازایی نیروی ترمزی استفاده شود. در مدل خودروی هیبرید موازی، بازایی نیروی ترمزی تنها روی چرخ‌های جلو اعمال می‌شود بنابراین کنترلی برای حفظ تعادل خودرو همواره تنها ۶۰ درصد توان ترمزی را بازایی می‌کند و باقی توسط ترمزهای اصطکاکی تامین می‌شود.

دسته ۲: توان درخواستی از حداکثر توان تولیدی موتور احتراقی در سرعت تعیین شده بیشتر است. در این حالت کنترلی CVT وضعیت حرکتی ۴ را انتخاب خواهد کرد تا موتور الکتریکی به کمک موتور احتراقی آمده و توان لازم تامین شود.

دسته ۳: توان درخواستی مثبت بوده و از حداکثر توان قابل تولید موتور احتراقی در سرعت تعیین شده کمتر است. در اینجا دو وضعیت ۲ و ۳ امکان‌پذیر هستند و کنترلی CVT برای انتخاب وضعیت حرکتی مناسب از منطق فازای استفاده می‌کند. در صورتیکه وضعیت ۳ انتخاب شود کنترلی توان اضافی موتور احتراقی برای شارژ باتری را نیز تعیین می‌کند.

طراحی کنترلی فازای

تئوری فازای ابتدا در ۱۹۶۵ توسط پروفیسور لطفی‌زاده معرفی شد. این روش برای سیستم‌های غیرخطی با پارامترهای متغیر با زمان بسیار مناسب است.

در طراحی کنترلی فازای طراحی ساختار و پارامترهای آن بسیار حائز اهمیت است. ساختار کنترلی فازای استفاده شده در جدول ۳ آورده شده است.

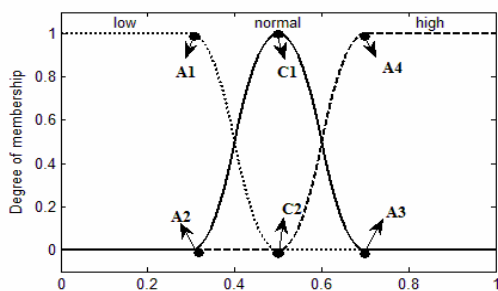
جدول ۳: ساختار کنترلی فازای

| نوع ساختار استنتاجی | ممدانی |
|--------------------------|----------|
| عملگر AND | مینیمم |
| عملگر OR | ماکزیمم |
| روش استنتاج ^۱ | مینیمم |
| روش تجمع ^۲ | ماکزیمم |
| روش غیرفازی‌سازی | مرکز ثقل |

ورودی‌های کنترلی فازای توان درخواستی و وضعیت شارژ باتری و خروجی آن توان تولیدی موتور احتراقی است.

برای هر کدام از ورودی‌ها و خروجی کنترلی فازای سه تابع عضویت در نظر گرفته شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در مجموع ۹ قاعده فازای، براساس شناخت طراح از مساله، استخراج شده که خلاصه آن در جدول ۴ آورده شده است.

برازش^۱ (در صورت برآورده شدن شرط لازم الگوریتم پایان می‌پذیرد)
 ۳- انتخاب افراد مستعد و ایجاد نسل جدید ۴- اعمال عملگرهای
 ژنتیک (آمیزش، جهش) ۵- بازگشت به مرحله دوم.
 با تغییر موقعیت هر یک از نقاط A₁ تا A₄ در توابع عضویت
 ورودی‌ها (در مجموع ۸ نقطه) نتایج جدیدی حاصل می‌شود. از این
 نتایج برای ایجاد جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است
 (شکل ۷). موقعیت نقاط C₁ و C₂ ثابت بوده تا یکپارچگی قواعد
 فازی همواره حفظ شود.



شکل ۷: موقعیت نقاط متغیر و ثابت در توابع عضویت

محدوده تغییرات A₁ و A₂ از صفر تا ۰٫۵ و محدوده تغییرات A₃
 و A₄ از ۰٫۵ تا ۱ است. با توجه به گستردگی محدوده تغییرات و
 زمان طولانی محاسبات، برای هر نقطه تنها دو موقعیت در نظر گرفته
 شده، سپس از نتایج بدست آمده (۲^۸ داده) یک شبکه عصبی^۲ ایجاد
 شده است.

برای آموزش شبکه عصبی موقعیت ۸ نقطه متغیر A در توابع
 عضویت به عنوان ورودی و نرخ مصرف سوخت، نرخ تولید آلاینده
 HC، CO، NO_x به عنوان خروجی قرار داده شده‌اند. شبکه عصبی
 از نوع "رو به جلو"^۳ بوده که برای آموزش آن از روش پس انتشار
 خطا استفاده شده است. تابع فعال‌سازی، تابع تانژانت هیپربولیک بوده
 و برای محاسبه خطای شبکه از خطای مربع میانگین^۴ استفاده شده
 است.

نتایج

مشخصات اجزا اصلی خودروی هیبرید موزی مدل شده، در جدول ۵
 آورده شده است. در قسمت مدل‌سازی از مدل‌های موجود در نرم‌افزار
Advisor برای اجزا اصلی استفاده شده و اندازه این اجزا چنان انتخاب
 شده است که خودرو قادر باشد شرایط مطرح شده در جدول ۱ را
 برآورده سازد. برای سایر اطلاعات، از مشخصات مدل "خودروی
 کوچک"^۵ استفاده شده است.

در انجام محاسبات، شارژ اولیه باتری ۶۰٪ در نظر گرفته شده و
 برای حفظ حالت شارژ باتری در پایان سیکل رانندگی، هر شبیه‌سازی

با توجه به جدول قواعد فازی، در صورتیکه توان موتور احتراقی
 در ناحیه "کم" باشد (به عنوان مثال کمتر از ۵ kW) می‌توان نتیجه
 گرفت شارژ باتری در ناحیه متوسط و یا بالا بوده است. بنابراین چون
 توان درخواستی از موتور احتراقی کم و وضعیت شارژ باتری مناسب
 است، کنترلر وضعیت حرکتی ۲ را انتخاب کرده و تنها موتور
 الکتریکی تولید کننده توان حرکتی خواهد بود، در غیر این صورت
 وضعیت ۳ انتخاب می‌شود، در این وضعیت در صورت نیاز به شارژ
 باتری، توان اضافی موتور احتراقی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:
 توان درخواستی - توان موتور احتراقی = توان اضافی (۲)

بدین ترتیب کنترلر فازی با توجه به وضعیت شارژ باتری،
 وضعیت مناسب حرکت خودرو را از بین وضعیت‌ها ۲ و ۳ انتخاب
 کرده و در صورت نیاز توان اضافی برای شارژ باتری را نیز بدست می-
 دهد.

جدول ۴: توان خروجی موتور احتراقی

| توان درخواستی | | وضعیت شارژ باتری | |
|---------------|--------|------------------|--------|
| کم | بهبینه | کم | بهبینه |
| زیاد | بهبینه | نیاز به شارژ | متوسط |
| کم | بهبینه | نیاز به شارژ | متوسط |
| کم | بهبینه | نیاز به شارژ | متوسط |
| کم | بهبینه | نیاز به شارژ | متوسط |

محاسبه نسبت دنده

با مشخص شدن وضعیت حرکتی خودرو، کنترلر CVT به نمودارهای
 بهینه محاسبه شده موتور احتراقی و الکتریکی مراجعه کرده و با
 توجه به توان درخواستی، سرعت موتور مورد نظر را بدست می‌آورد. با
 معلوم بودن این سرعت که سرعت ورودی به جعبه‌دنده است و
 سرعت خروجی از جعبه‌دنده (از نمودار تغییرات سرعت-زمان سیکل
 رانندگی قابل محاسبه است) نسبت‌دنده بهینه محاسبه می‌شود:

$$\text{GearRatio} = \frac{\text{Input Speed}}{\text{Output Speed}} \quad (۳)$$

بهینه‌سازی کنترلر فازی

کنترلر فازی به کار رفته در بخش قبل الزاما بهترین نتیجه را بدست
 نمی‌دهد. در این بخش به منظور حصول نتایج مطلوب‌تر، کنترلر
 فازی توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. در مسیر بهینه-
 سازی علاوه بر پارامترها، باید ساختار کنترلر نیز بهینه شود.
 در این مقاله با توجه به نقش کنترلر فازی در ساختار کنترلر
 CVT و برای جلوگیری از پیچیدگی مساله، ساختار کنترلر فازی
 ثابت و تنها پارامترها قابل تغییر فرض شده‌اند، از طرفی با توجه به
 نرمال کردن ورودی‌ها مفهوم قواعد فازی نیز حفظ شده و قواعد فازی
 نیز ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک را می‌توان در ۵ مرحله کلی
 خلاصه کرد: ۱- ایجاد نسل اولیه ۲- ارزیابی افراد نسل توسط تابع

- ۱ Fitness Function
- ۲ Neural Network
- ۳ Feed Forward
- ۴ Mean Square Error
- ۵ Hypothetical small car

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله استراتژی جدیدی بر مبنای انتخاب بهترین نسبت‌دنده در یک جعبه‌دنده CVT، برای یک خودروی هیبرید موازی پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از اعمال استراتژی روی سیکل‌های رانندگی استاندارد محاسبه و این نتایج برای رسیدن به حالت مطلوب‌تر توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. برای کاهش زمان محاسبات یک مدل شبکه عصبی از خودروی هیبریدی آموزش داده شده است. بررسی و مقایسه نتایج حاصل از استراتژی کنترلی و کنترلر پیش-فرض Advisor، بیانگر موفقیت روش پیشنهادی در کاهش مصرف سوخت، کاهش نسبی آلاینده‌ها، حفظ پارامترهای عملکردی و حفظ وضعیت شارژ باتری در محدوده مورد نظر است.

تشکر و قدردانی

در اینجا از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت به دلیل حمایت‌های آن در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Chau, K.T., and Wong, Y.S., 2002. "Overview of power management in hybrid electric vehicles". *Energy Conversion and Management*, 43, pp. 1953–1968
- [2] Kim, Ch., NamGoong, E., and Lee, S., 1999. "Fuel Economy Optimization for Parallel Hybrid Vehicles with CVT". *SAE*, 1999-01-1148.
- [3] Schouten, N. J., Salman, M. A., and Kheir, N. A., 2003. "Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic". *Control Engineering Practice*, 11 (2), pp. 171–177.
- [4] Poursamad, A., and Montazeri, M., 2008. "Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles". *Control Engineering Practice*, 16, pp. 861–873.
- [5] Schouten, N. J., Salman, M. A., and Kheir, N. A. 2002. "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles". *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 10(3), pp. 460–468.
- [6] Salman, M., Schouten, N. J., and Kheir, N. A., 2000. "Control Strategies For Parallel Hybrid Vehicles". *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, (June).
- [7] Kheir, N. A., Salman, M. A., and Schouten, N. J., 2004. "Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic". *Mathematics and Computers in Simulation*, 66, pp. 155–172.
- [8] Modak, G. S., and Sane, S. S., 2006. "Mechanical Continuously Variable Transmission (CVT) for Parallel Hybrid vehicle". *IEEE*.
- [9] Pfiffner, R., Guzzella, L., and Onder, C.H., 2003. "Fuel-optimal control of CVT powertrain". *Control Engineering Practice*, 11, pp. 329-336.

چندین مرتبه تکرار شده است تا اختلاف حالت نهایی و ابتدایی شارژ باتری در محدوده کمتر از ۰٫۰۵ درصد شارژ اولیه قرار گیرد.
جدول ۵: مشخصات اجزا اصلی خودروی هیبرید موازی

| | |
|------------------|--|
| موتور احتراقی | Geo 1.0L, SI Engine (41 kW) |
| موتور الکتریکی | Westinghouse AC induction motor/inverter (75 kW) |
| باتری | Ovonic, NiMH HEV battery (45Ah) |
| جعبه‌دنده | CVT هیدرومکانیکی به همراه دیفرانسیل (نسبت‌دنده از ۳ تا ۱۵) |
| کاتالیست | Close-coupled catalyst |
| وزن خودرو با بار | ۱۲۷۱ kg |

نتایج اولیه و بهینه‌سازی شده حاصل از اعمال کنترلر CVT و کنترلر فازی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: نتایج اولیه و بهینه‌سازی شده

| سیکل رانندگی | کنترلر | مصرف سوخت | HC | CO | NO _x |
|--------------|------------|-----------|--------|--------|-----------------|
| g/100km | | | | | |
| FTP | Advisor | ۶٫۶۸۳۷ | ۰٫۲۹۳۹ | ۱٫۱۹۸۷ | ۰٫۳۲۳۸ |
| | فازی اولیه | ۶٫۴۰۳۵ | ۰٫۲۹۸۸ | ۱٫۱۸۸۵ | ۰٫۳۳۲۹ |
| | فازی بهینه | ۶٫۲۴۵۹ | ۰٫۲۹۶۶ | ۱٫۱۵۱۴ | ۰٫۳۲۲۷ |
| NEDC | Advisor | ۶٫۸۸۰۷ | ۰٫۴۳۰۴ | ۱٫۳۲۴۸ | ۰٫۳۸۳۹ |
| | فازی اولیه | ۶٫۵۱۰۴ | ۰٫۴۴۱۶ | ۱٫۴۶۴۶ | ۰٫۴۱۵۲ |
| | فازی بهینه | ۶٫۴۳۳۷ | ۰٫۴۱۹۲ | ۱٫۳۸۸۲ | ۰٫۳۵۸۹ |
| 1015 | Advisor | ۷٫۵۸۲۷ | ۰٫۹۶۷۴ | ۲٫۶۹۶۴ | ۰٫۷۴۰۹ |
| | فازی اولیه | ۶٫۹۳۵۳ | ۰٫۹۹۱۱ | ۳٫۱۹۵۹ | ۰٫۸۴۹۱ |
| | فازی بهینه | ۶٫۸۷۳۷ | ۰٫۹۸۹۶ | ۳٫۲۱۳۸ | ۰٫۸۴۲۶ |

مشخصات عملکردی خودرو در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: پارامترهای عملکردی خودرو با اعمال کنترلر CVT

| | |
|----------|---|
| ۸٫۱ (s) | ۰ - ۹۷ km/h |
| ۱۶٫۴ (s) | ۰ - ۱۳۷ km/h |
| ۳٫۹ (s) | ۶۴ - ۹۷ km/h |
| ۵۷٫۸ (m) | مسافت طی شده در ۵ ثانیه |
| ۵ | حداکثر شتاب (m/s ²) |
| ۷٫۳ % | شیب‌روی در سرعت ۸۹ km/h (به مدت ۲۰ دقیقه با ۲۷۲ kg بار اضافی) |
| ۲۰۰٫۵ | حداکثر سرعت (km/h) |

از جدول ۶ مشاهده می‌شود مقادیر آلاینده‌ها در مواردی پس از بهینه‌سازی نسبت به کنترلر Advisor افزایش یافته است. این افزایش به این دلیل است که هدف اصلی کنترلر CVT کاهش مصرف سوخت و حفظ آلاینده‌ها در محدوده مشخص بوده است.