

طراحی کنترل کننده ی بهینه مقاوم برای کاهش مصرف سوخت در خودروهای ترکیبی الکتریکی با استفاده از اطلاعات مسیر

علی اکبر جلالی^۱، سید علی ظهیری پور^۲، احسان ساعدی رودی^۳

^۱ استاد دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، drjalali@iust.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، zahiri@elec.iust.ac.ir

^۳ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، e.saedi90@gmail.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۱/۲۵)

چکیده: این مقاله به معرفی یک روش کنترل روشن-خاموش مبتنی بر داده‌های ترافیکی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به منظور کاهش هرچه بیشتر مصرف سوخت در خودروهای ترکیبی الکتریکی می‌پردازد. سادگی محاسبات، قوام نسبی و همچنین بهره‌وری بالای موتور احتراق داخلی در این روش از جمله مزایای آن محسوب می‌شوند. در این روش با توجه به اطلاعات مسیر، نقطه‌ی تعادل B برای شارژ و دشارژ باتری محاسبه می‌شود که می‌تواند محلی برای تصمیم‌گیری روشن یا خاموش شدن موتور احتراق داخلی باشد. به منظور حذف نوسانات بالا در عملکرد موتور احتراق داخلی که ممکن است در این روش پدید آید روش اصلاح شده با جابه‌جا کردن موقت نقطه تعادل با توجه به شرایط کاری موتور، امکان پیاده‌سازی عملی این روش را افزایش داده است. همچنین با تکرار محاسبات در طول مسیر و نیز وزن دهی به داده‌ها براساس قابلیت اعتماد آن‌ها قوام آن نیز نسبت به خطای اطلاعات مسیر بسیار افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: اطلاعات مسیر، روش روشن-خاموش، نقطه تعادل B

Design of Robust Optimal Controller for Hybrid Electric Vehicle by using Road Information

Ali Akbar Jalali, Seyed Ali Zahiripour, Ehsan Saedi Roodi

Abstract: This article is introducing an engine on – off method for fuel optimization in hybrid electric vehicle's base on the road information. Simplicity, robustness and engine efficiency are advantages of this method. Based on the road information, the method calculates the balance point for electrical energy in energy storage system. This point is used for decision to engine operation. A major drawback with the proposed method is possibility of rapid engine on / off operation. By temporary changing the balance point to balance band, this drawback will be partly removed. Also the proposed method is enhanced by weighting the information and recalculating the balance point in the mission. The enhanced method is robust for large amount of error.

Keywords: road information, engine on-off method, balance point

۱- مقدمه

بهینه سازی در خودروهای ترکیبی الکتریکی از دو مسیر عمده صورت می گیرد. اول جذب بخشی از انرژی جنبشی خودرو هنگام ترمز کردن و کاهش سرعت و دوم فراهم نمودن امکان عمل کردن موتور احتراق داخلی در نقطه های نزدیک نقطه کار بهینه ی آن [۱]. تاکنون روش های مختلفی برای بهینه سازی مصرف - مدیریت منابع - در خودروهای ترکیبی الکتریکی معرفی شده اند. روش های قاعده مینا با در نظر گرفتن نیروی محرکه ی درخواستی، نقطه کار بهینه موتور احتراق داخلی و میزان شارژ باتری ها، توان درخواستی را بین دو منبع تولید آن تقسیم می کند. پیاده سازی این قواعد اغلب در قالب کنترل کننده های فازی ارائه می شود. [۲] و [۳].

روش های تحلیلی کنترل بهینه با تعریف تابع هزینه، اقدام به حداقل سازی آن در تمام طول مسیر می کنند و بنابراین نیاز به اطلاعات کامل مسیر دارند. استفاده از برنامه ریزی پویا و قواعد پونتریاگین از روش های حل این مسائل می باشند [۴]. به منظور کاهش وابستگی این روش ها به اطلاعات مسیر روش های مختلفی معرفی شده اند [۵].

با پیشرفت روش های دور سنجی، امکان اندازه گیری سرعت خودروها و در نتیجه نرخ ترافیک در مسیر به وجود آمده است [۶]. روش های کنترلی بسیاری بر مبنای این داده ها ارائه شده و نشان داده شده است که می تواند بهبود نسبی در عملکرد خودروهای ترکیبی الکتریکی ایجاد نماید [۷]. در یکی از روش ها مسیر را به بازه های کوچکتر تقسیم نموده و نیروی پیشرانه درخواستی در هر بازه را محاسبه کرده و با برنامه ریزی پویا سهم هر کدام از منابع را در این مسیر مشخص می نمایند [۸]. در روشی دیگر با استفاده از داده های سرعت مسیر تا یک افق محدود، یک روش کنترلی روشن - خاموش به کار گرفته شده است که برای بهینه سازی از روش پونتریاگین استفاده نموده است [۹].

پس از این که سرعت خودرو و شیب مسیر تا انتهای حرکت به دست آمد، می توان با توجه به مدل دینامیکی خودرو، نیروی پیشرانه ی درخواستی خودرو در طول مسیر را محاسبه نمود.

با داشتن نیروی پیشرانه درخواستی، می توان نقطه ی تعادلی را به دست آورد که تصمیم گیری برای عملکرد موتور احتراق داخلی بر مبنای آن صورت خواهد گرفت. در واقع این روش با افزودن اطلاعات مسیر به روش های قاعده مینا می تواند به بهبود عملکرد این روش ها کمک نماید.

این مقاله ابتدا نشان می دهد که اگر موتور احتراق داخلی در حالت روشن خاموش بین توان صفر و توان نقطه کار بهینه عمل نماید مصرف سوخت مینیم خواهد شد. در ادامه با توجه به اطلاعات مسیر روشی برای تعیین نقاط روشن و خاموش شدن موتور احتراق داخلی معرفی می کند. در قسمت بعد با اصلاح روش به عملیاتی تر شدن آن کمک می کند و در نهایت شبیه سازی هایی به منظور بررسی عملکرد سیستم ارائه خواهد داد.

۲- مینیمم سازی مصرف سوخت

قضیه ۱- بهینه بودن روش روشن - خاموش

فرض ۱- سیستم الکتریکی ایده آل است. (باتری ها و موتور الکتریکی و همچنین سیستم های انتقال توان تلفات ندارند)

فرض ۲- نیروی پیشرانه درخواستی متوسط مسیر، کمتر از توان موتور احتراق داخلی در نقطه کار بهینه ی آن می باشد.

با وجود فرضیات (۱) و (۲)، اگر موتور احتراق داخلی در حالت روشن خاموش بین توان صفر و توان نقطه کار بهینه عمل نماید مصرف سوخت مینیمم خواهد شد.

اثبات:

با توجه به اطلاعات سرعت در طول مسیر و به کمک مدل خودرو می توان توان درخواستی در طول مسیر P_{Total} را بدست آورد.

$$P_{Total} = P_a - P_b \quad (۱)$$

که در رابطه ی بالا P_a توان درخواستی خودرو در شتاب های مثبت و صفر و P_b توان درخواستی در شتاب منفی می باشد.

از آنجایی که از باتری ها بعنوان منبع اصلی انرژی استفاده نمی شود پس تمام P_{Total} می بایست توسط موتور احتراق داخلی تأمین شود. یعنی

$$P_{engin} = P_{Total} \quad (۲)$$

همچنین مقدار انرژی مصرفی موتور احتراق داخلی در نقطه کار بهینه P_{oe} نام گذاری می شود.

حال اگر طول مسیر را N در نظر بگیریم آنگاه بردار انرژی مصرفی بهینه ی موتور احتراق داخلی خواهد بود:

$$W_o = [w^*(1) \quad \dots \quad w^*(N)] \quad (۳)$$

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^N w^*(i) \eta_i \Delta i \quad (۴)$$

در رابطه ی (۴) بازدهی موتور با η_i و بازه زمانی با Δi نمایش داده شده است.

حال اگر مقدار بهینه در یکی از نقاط، عددی جز صفر یا P_{oe} باشد

$$w^*(k) = 0 \text{ or } P_{oe} \quad (۵)$$

و مقدار بازده موتور احتراق داخلی در این توان برابر باشد با η_k و در نقطه کار بهینه η_{oe} باشد

$$\eta_k < \eta_{oe} \quad (۶)$$

آنگاه هدر رفت انرژی w_k در این نقطه برابر خواهد بود با:

$$L_k = w^*(k) * (1 - \eta_k) * \Delta i \quad \Delta i = \frac{T}{N} \quad (۷)$$

و انرژی تولید شده در این نقطه نیز برابر خواهد بود با E_k :

$$E_k = w^*(k) * \eta_k * \Delta i \quad (۸)$$

که در آن T طول زمان حرکت می باشد. حال با تغییر گام زمانی (بدلیل پیوسته بودن سیستم) می توان این میزان انرژی را در مدت زمان متفاوتی با عملکرد موتور در نقطه کار بهینه به دست آورد:

$$E_k = P_{oe} \eta_{oe} \Delta j, \quad \Delta j = 1, \dots, M \quad (۹)$$

بردار نیروی پیشرانه درخواستی در تمامی نقاط مسیر P_r را در اختیار قرار می-دهد.

$$P_r = [P_1 \quad \dots \quad P_N] \quad (15)$$

می توان نقطه ی B را به گونه ای انتخاب کرد که در آن داشته باشیم:

$$\sum_{B < P_i < P_{oei}} (P_{oe} - p_i) + \sum_{P_i < 0} (-p_i) \quad (16)$$

$$= \sum_{0 < P_i < B} P_i + \sum_{P_i > P_{oei}} (P_i - P_{oei})$$

در معادله ی بالا، عبارات سمت چپ تساوی، انرژی اضافی قسمت هایی از مسیر هستند که در آن ها می توان باتری ها را شارژ نمود و عبارات سمت راست تساوی انرژی درخواستی و یا بخشی از انرژی درخواستی شامل قسمت هایی از مسیر هستند که در آن ها باید از انرژی باتری ها به منظور تولید تمام یا بخشی از نیروی پیشرانه استفاده کرد. بنابراین با تساوی این دو عبارت می توان به این نتیجه رسید که سطح شارژ باتری ها در انتهای مسیر برابر با سطح شارژ باتری ها در ابتدای مسیر است.

جدول (۱) عملکرد این روش با توجه به توان درخواستی را نشان می دهد.

جدول ۱: عملکرد روش بهینه سازی بر مبنای نیروی پیشرانه درخواستی مسیر

| نیروی درخواستی | نیروی موتور احتراق داخلی | نیروی موتور الکتریکی |
|------------------|--------------------------|----------------------|
| $p < 0$ | $p_e = 0$ | $p_m = p$ |
| $0 < p < B$ | $p_e = 0$ | $p_m = p$ |
| $B < p < P_{oe}$ | $p_e = P_{oe}$ | $p_m = P_{oe} - p$ |
| $p > P_{oe}$ | $p_e = P_{oe}$ | $p_m = p - P_{oe}$ |

مزایای روش معرفی شده در این قسمت، رسیدن به حداکثر بهینه سازی - با توجه به اثبات بخش قبل - و همچنین سادگی محاسبات و عدم وابستگی روش به اطلاعات لحظه به لحظه می باشد. به این دلیل که محاسبات این روش بر اساس داده تجمعی صورت می گیرد، خطای موجود روی داده ها بخصوص خطای اندازه گیری تأثیر بسیار کمی بر عملکرد سیستم - تعیین نقطه تعادل - دارد. بنابراین اگر نرخ ترافیک ثابت بماند و فقط جابه جایی در آن وجود داشته باشد، عملکرد سیستم بازم بهینه خواهد بود. البته باید یادآور شد که عملکرد سیستم همواره بهینه خواهد بود، مسئله ای که در اینجا مطرح است رعایت شرط سطح شارژ باتری ها می باشد که در انتهای مسیر تقریباً با ابتدای آن برابر باشد.

از جمله معایب این روش در دسترس نبودن سرعت سیستم در تمام نقاط طول مسیر است. بدین معنی که شبکه ی سنسورهای سرعت سنج که در مسیر نصب شده اند سرعت را در نقاطی با فواصلی از یکدیگر اندازه گیری می کنند و سرعت در بین این دو نقطه را به دست نخواهند داد. بنابراین باید سرعت سیستم را در این فواصل تخمین زد. یکی دیگر از مشکلات این روش، روشن - خاموش شدن های پی در پی و سریع موتور احتراق داخلی است که با توجه به شرایط مسیر، ممکن است به وجود آید. که می تواند باعث عدم عملکرد بهینه موتور احتراق داخلی و همچنین ایجاد مزاحمت و خرابی در زیر سیستم های خودرو شود.

$$\Delta j = \frac{T}{M} \Rightarrow \Delta j = \frac{N}{M} \Delta i \quad (10)$$

با توجه به (۹) هدر رفت انرژی در این حالت L'_k برابر است با:

$$L'_k = P_{oe} (1 - \eta_{oe}) \Delta j = P_{oe} \Delta j - E_k \quad (11)$$

با توجه به روابط (۸)، (۹) و (۶) می توان نتیجه گرفت

$$P_{oe} \Delta j < w^*(k) \Delta i \quad (12)$$

و از (۱۱) و (۱۲) می توان نوشت

$$L'_k < w^*(k) \Delta i - E_k \quad (13)$$

و نهایتاً با استفاده از (۱۳)، (۸) و (۷) بدست خواهد آمد

$$L'_k < w^*(k) (1 - \eta_k) \Delta i = L_k \quad (14)$$

بنابراین $w^*(k) \neq 0$ or p_{oe} بهینه نبوده و جواب بهینه

p_{oe} ، نقطه کار بهینه موتور احتراق داخلی در بازه ی زمانی متفاوت است.

در مورد فرض ایده آل بودن سیستم الکتریکی باید گفت این سیستم اگرچه ایده آل نیست اما بازدهی سیستم الکتریکی نسبت به موتور احتراق داخلی بسیار بالاست، به طوری که می توان جز در نقاط محدود، این فرض را پذیرفت. فرض دوم نیز در تمامی مسیرهای استاندارد مورد قبول است.

۳- روش بهینه سازی

در مسائل بهینه سازی علاوه بر تابع هزینه مسئله که غالباً باید حداقل شود، قیودی نیز وجود دارد که روش، باید آن ها را برآورده سازد. تابع هزینه مسئله بهینه سازی مصرف سوخت در خودروی ترکیبی الکتریکی، انتگرال مصرف سوخت در طول مسیر می باشد که نشان داده شده اگر موتور احتراق داخلی بین دو نقطه ی صفر و نقطه کار بهینه به صورت کلید زنی عمل نماید مصرف سوخت حداقل خواهد شد. اما مهم ترین قیدی که در این مسئله مطرح است، سطح شارژ باتری ها در انتهای مسیر می باشد که باید مساوی با سطح شارژ باتری در ابتدای مسیر باشد یعنی این که از انرژی الکتریکی بعنوان منبع انرژی اصلی استفاده نشود. بنابراین تصمیم گیری در مورد این که موتور احتراق داخلی در چه نقاطی خاموش باشد و در چه نقاطی روشن - و در نقطه کار بهینه - باشد، با توجه به این قید باید صورت پذیرد. برای این منظور باید میان انرژی گرفته شده از باتری ها و انرژی تحویل داده شده به آن ها تعادل وجود داشته باشد.

در یک مسیر مشخص اطلاعات مسیر، شامل دو دسته اطلاعات سرعت حرکت و شیب مسیر در تمامی نقاط می باشد. سرعت حرکت، توسط سرعت سنج و شیب مسیر با استفاده از یک سنسور اندازه گیری فاصله عمودی نقاط ابتدایی و انتهایی خودرو و با دانش طول خودرو قابل محاسبه است. با توجه به این دو دسته داده و به کمک مدل خودرو، توان مورد نیاز برای رسیدن به مقادیر سرعت در شیب جاده قابل محاسبه می باشد. در نتیجه داده ی اطلاعات مسیر به همراه مدل خودرو

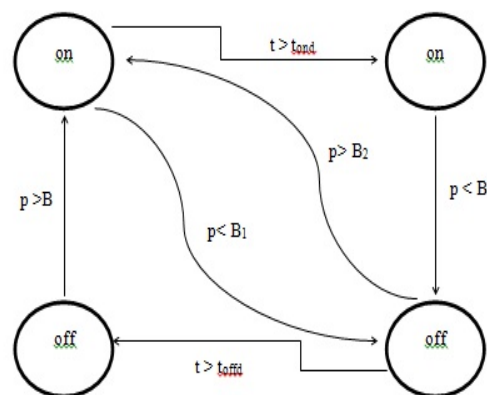
۴- اصلاح شده روش روشن-خاموش شدن های

پی در پی

از میان دو اشکال عمده ای که برای روش عنوان شدند، در صورتی که سرعت خودرو، نوسانات سریع و کوچک در فواصل بین دو اندازه گیری نداشته باشد، اشکال اول اثر چندانی نخواهد داشت. نوسانات سرعتی که ممکن است روی مسیر به وجود آید بیشتر ناشی از رانندگی نامناسب و غیر بهینه می باشد. با مجهز نمودن خودرو به سیستم کروز کنترل و در شرایط ایده آل، استفاده از راهبری هوشمند می توان این نوسانات را به حداقل ممکن رسانید [۱۰]. به عنوان راه حل دیگر، می توان به افزایش تعداد سنسورها در شبکه اشاره نمود. اگر تعداد خودروهای ترکیبی الکتریکی زیاد شود، آنگاه از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه خواهد بود و می توان تعداد این سنسورها را بسیار افزایش داد. اما بررسی این روش ها موضوع این مقاله نیستند.

اشکال دوم یعنی روشن و خاموش شدن سریع موتور احتراق داخلی، ایرادی است که بیشتر مربوط به روش می باشد و می توان برای حل آن روش را بهبود بخشید. روش اصلاح شده به صورت زیر است:

هنگامی که موتور احتراق داخلی روشن می شود، یک زمان سنج فعال شده و تا هنگامی که زمان آن به t_{ond} برسد، به جای نقطه ی تعادل B برای خاموش شدن موتور احتراق داخلی، از نقطه ی جدید $B_1 < B$ استفاده شود. بنابراین موتور احتراق داخلی به ازاء گشتاور درخواستی پایین تر نیز روشن خواهد ماند و بنابراین به سرعت خاموش نخواهد شد. تعیین مقادیر t_{ond} و B_1 بعنوان پارامترهای طراحی می تواند با توجه به نوع مسیر و مقدار B انجام پذیرد. پس از سپری شدن زمان تعیین شده، نقطه ی تعادل تصمیم گیری دوباره همان مقدار محاسبه شده ی B تعیین می شود و بنابراین تأثیر قابل توجهی بر مقدار شارژ باتری نخواهد داشت. به همین شکل هنگامی که موتور احتراق داخلی خاموش می شود، یک زمان سنج فعال شده و تا هنگامی که زمان آن به t_{off} برسد، به جای نقطه ی تعادل B برای روشن شدن موتور احتراق داخلی، از نقطه ی تعادل جدید $B_2 > B$ استفاده شود. بنابراین موتور احتراق داخلی به ازاء گشتاور درخواستی بالاتری نیز روشن نخواهد شد و بنابراین زمان خاموش ماندن موتور احتراق داخلی می تواند بیشتر شود، پس از گذشتن این مدت زمان، نقطه ی تعادل دوباره همان مقدار B تعیین می شود و مانند قبل اثر قابل توجهی روی سطح شارژ باتری ها نخواهد داشت.



شکل ۱: نمودار وضعیت موتور احتراق داخلی در روش اصلاح شده

۵- مقاوم سازی روش

در هر سیستم با توجه به خصوصیات دینامیکی آن و نیز شرایط محیط در نظر گرفتن پاره ای از موارد نامعینی ضروری تر به نظر می رسد. در این مقاله از آنجا که کنترل کننده مبتنی بر اطلاعات مسیر می باشد و همچنین این اطلاعات همواره مقدار قابل توجهی خطا خواهد داشت، بررسی اثر خطای اطلاعات مسیر نسبت به سایر نامعینی ها اهمیت بیشتری دارد. همچنین از میان دو سری داده ی اطلاعات مسیر، اطلاعات مربوط به شیب جاده قابلیت اعتماد بیشتری دارد و اطلاعات مربوط به سرعت بیشترین خطا را خواهد داشت.

رفع اثر خطای اطلاعات مسیر و همچنین حفظ عملکرد بهینه ی سیستم، بدون داشتن اطلاعات با دقت بالاتر از مسیر امکان پذیر نیست. اطلاعات با دقت بالاتر در فواصل زمانی کم تر می تواند در دسترس باشد. هرچه محاسبات برای فواصل زمانی کم تر انجام شوند اطلاعات دقیق تری در دسترس خواهد بود و نتایج بهتری به دست خواهد آمد. از طرفی خطای مربوط به اطلاعات مسیر، باعث عدم رعایت قید مربوط به شارژ باتری ها می شود. چون روش موتور احتراق داخلی را فقط در دو نقطه ی بهینه یا خاموش مورد استفاده قرار می دهد، مصرف سوخت معادل تأثیر قابل توجهی نمی پذیرد. رعایت نشدن قید شارژ باتری ها را باید نتیجه ی اثر محاسبه ی اشتباه نقطه ی تعادل دانست. چون در صورتی که نقطه ی تعادل درست انتخاب شود معادلات مربوط به انرژی باتری ها برقرار خواهند بود و در نتیجه قید مربوط به شارژ باتری ها رعایت خواهد شد. بنابراین اگر بتوان اثر خطا را روی نقطه ی تعادل کم کرد اثر آن روی عملکرد سیستم نیز کاهش خواهد یافت.

با توجه به دو پاراگراف قبل، تکرار محاسبه ی نقطه ی تعادل در فواصل زمانی - مکانی معین می تواند باعث بهبود عملکرد سیستم در حضور خطای اطلاعات مسیر شود. اگر بتوان در هر بار دریافت اطلاعات مسیر و محاسبه ی مجدد نقطه ی تعادل، اثر خطای دفعات قبل را کم کرد، روش می تواند عملکرد بهینه و مقاوم قابل قبولی ارائه دهد. خنثی کردن اثر خطای نقطه ی تعادل در محاسبات قبل می تواند با تغییر دادن معادله ی تعادل در لحظه ی محاسبه t_1 به شکل زیر صورت پذیرد. معادله ی تعادل جدید، باید برای زمان های $t > t_1$ محاسبه شود. همچنین داده های مربوط به لحظه های نزدیک تر، درستی بیشتری نسبت به داده های مربوط به زمان های دورتر از لحظه ی محاسبه ی نقطه ی تعادل دارند. این عامل را می توان در محاسبات مربوط به نقطه ی تعادل در نظر گرفت و هر داده را با ضریب صحت آن در معادله ی تعادل در نظر گرفت. در این صورت می توان معادله ی تعادل انرژی باتری ها را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\sum_{B < P_i < P_{oei}} a_i (P_{oe} - P_i) + \sum_{P_i < 0} (-a_i P_i) \\ = \sum_{0 < P_i < B} a_i P_i + \sum_{P_i > P_{oei}} a_i (P_i - p_{oei}) + \Delta_{E-ess}, t > t_1 \quad (17)$$

که در این رابطه مقادیر a_i دقت P_i و بین t_0 تا t_1 است و Δ_{E-ess} اختلاف انرژی ذخیره شده در باتری ها در لحظه ی محاسبه t_1 نسبت به لحظه ی شروع است.

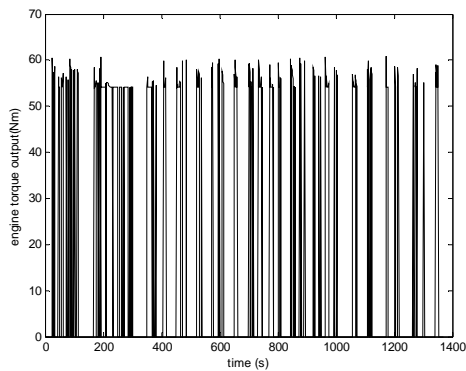
$$\Delta_{E-ess} = E_{ess,0} - E_{ess,t_1} \quad (18)$$

۶- نتایج شبیه سازی

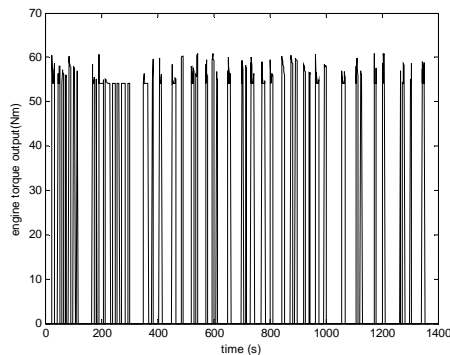
برای شبیه سازی از جعبه ابزار ADVISOR [۱۱] در محیط متلب استفاده شده است. برای مقایسه از روش فازی موجود در جعبه ابزار استفاده شده است. روش

تبادل در روش این مقاله به گونه ای جابه جا شود که شارژ نهایی آن با روش فازی سبک سوخت برابر شود، در آن صورت مصرف سوخت روش ۴.۴ لیتر بر صد کیلومتر به دست می آید که بیش از ۴ درصد بهینه سازی را نشان می دهد. همچنین اگر نقطه ی تبادل به گونه ای جابه جا شود که شارژ نهایی با شارژ نهایی روش فازی سبک بهره وری برابر شود، آنگاه مصرف سوخت دقیقاً با مقدار روش فازی سبک بهره وری یکسان خواهد شد. بنابراین روش مقاله مصرف سوخت معادل یکسانی با روش فازی سبک بهره وری دارد اما شارژ باتری ها را با دقت بسیار بیشتری به نقطه ی اولیه باز می گرداند.

همچنین برای مقایسه ی عملکرد روش تصحیح شده با باند تعادل موقت در کاهش نوسانات عملکرد موتور احتراق داخلی، می توان نمودار گشتاور موتور احتراق داخلی را برای دو روش اولیه ی مقاله و روش تصحیح شده رسم نمود (شکل های ۳ و ۴). در این شکل ها می توان کاهش نوسانات عملکرد موتور احتراق داخلی را در روش تصحیح شده نسبت به روش اولیه مشاهده کرد.



شکل ۳: گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی با روش اولیه ی مقاله



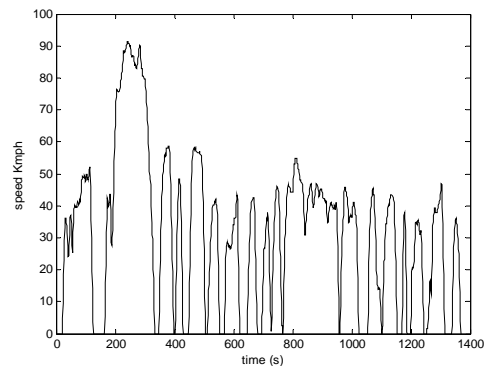
شکل ۴: گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی با روش تصحیح شده

برای بررسی قوام کنترل کننده، از خطای سرعت در اطلاعات مسیر به صورت شکل (۵) استفاده شده است.

فازی در دو سبک بهره وری^۱ و سوخت^۲ با پایگاه قواعد مجزا و توابع عضویت یکسان هستند. در سبک بهره وری، هدف قرار دادن موتور احتراق داخلی در نقطه کار بهینه است و در سبک سوخت، هدف، حداقل کردن مصرف لحظه ای سوخت است. روش فازی سبک بهره وری، اگرچه موتور احتراق داخلی را در نقطه کار بهینه مورد استفاده قرار می دهد اما قید سطح شارژ باتری ها را معمولاً رعایت نمی کند. بنابراین این روش معمولاً مصرف سوخت معادل (معادل سوختی مصرف سوخت و شارژ باتری ها) کمی دارد اما نمی توان از آن بعنوان یک روش مناسب استفاده کرد چرا که با شارژ کردن زیاد باتری ها می تواند باعث از دست رفتن قابلیت ترکیبی خودرو شود. چون وقتی باتری کاملاً شارژ شود دیگر نمی توان از آن برای ذخیره ی انرژی استفاده کرد و بنابراین سیستم الکتریکی بلا استفاده خواهد شد. با این وجود روش معرفی شده در این مقاله مصرف سوخت معادلی، برابر و یا کمتر از روش فازی سبک بهره وری دارد که در شبیه سازی ها نشان داده شده است.

مسیر UDDS

نمودار سرعت بر حسب زمان در طول مسیر به شکل زیر می باشد.



شکل ۲: سرعت مسیر UDDS بر حسب زمان

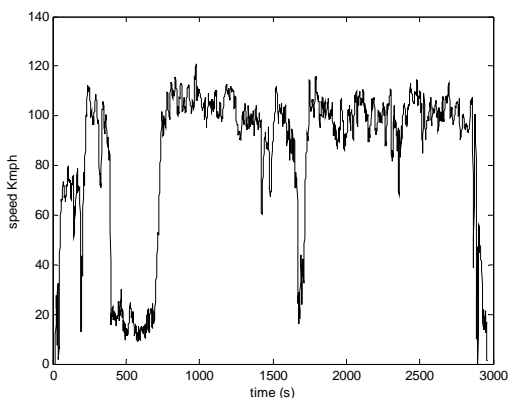
جدول ۲: مصرف سوخت در مسیر UDDS به ازای روش های مختلف بهینه سازی

| روش بهینه سازی | مصرف سوخت (لیتر بر صد کیلومتر) | شارژ نهایی باتری - شارژ اولیه ی باتری (نرمالیزه شده) |
|----------------------------------|--------------------------------|--|
| فازی سبک بهره وری | ۶.۶ | ۰.۰۸ |
| فازی سبک سوخت | ۴.۶ | - ۰.۰۶ |
| روش اولیه ی مقاله (نقطه ی تبادل) | ۵.۴ | ۰.۰۰۷ |
| روش تصحیح شده (باند تعادل موقت) | ۵.۵ | ۰.۰۰۷ |

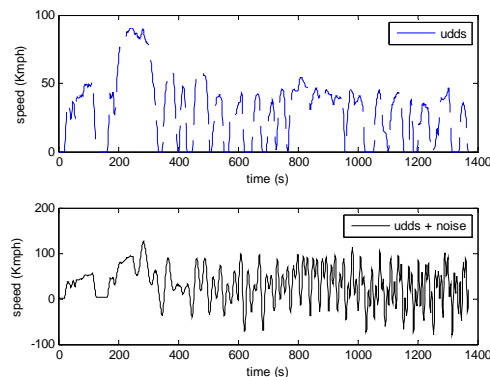
با توجه به جدول ۲ مصرف روش فازی سبک سوخت، نسبت به سایر روش ها کمتر به دست آمده است و البته دلیل آن نیز مصرف کردن شارژ باتری ها است که نسبت به سایر روش ها از شارژ بیشتری استفاده کرده است. در صورتی که نقطه ی

۱ - efficiency mode

۲ - fuel mode



شکل ۸: نمودار سرعت بر حسب زمان در مسیر vail2nrel



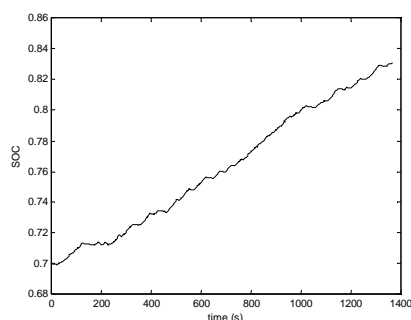
شکل ۵: نمودار سرعت - زمان مسیر UDDS همراه با خطا در نرخ ترافیک

مصرف سوخت در روش اولیه ۸ لیتر به ازای هر صد کیلومتر و مصرف سوخت در روش مقاوم ۶ لیتر به ازای هر صد کیلومتر به دست آمد.

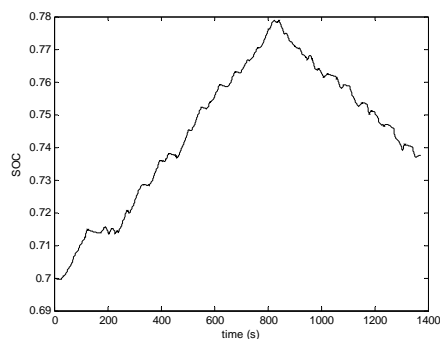
جدول ۳: مصرف سوخت در مسیر vail2nrel به ازای روش های مختلف بهینه سازی

| روش بهینه سازی | مصرف سوخت (لیتر بر صد کیلومتر) | شارژ نهایی باتری - شارژ اولیه ی باتری (نرمالیزه شده) |
|----------------------------------|--------------------------------|--|
| فازی سبک بهره وری | ۵.۱ | ۰.۳ |
| فازی سبک سوخت | ۶.۲ | - ۰.۰۳ |
| روش اولیه ی مقاله (نقطه ی تعادل) | ۴.۳ | - ۰.۰۵ |
| روش تصحیح شده (باند تعادل موقت) | ۴.۱ | - ۰.۱۶ |

در این مسیر نیز روش فازی سبک سوخت عملکرد ضعیفی نسبت به سایر روش ها نشان داده است. اما روش فازی سبک بهره وری، مصرف سوخت نسبتاً کمتری نسبت به روش فازی سبک سوخت دارد. باتری ها در روش فازی سبک بهره وری، کاملاً شارژ شده اند که همانطور که قبلاً گفته شد، یک خطای بسیار بزرگ در عملکرد سیستم ایجاد می کند. اما با این وجود در صورتی که مصرف سوخت معادل روش فازی سبک بهره وری با مصرف سوخت معادل روش مقاله مقایسه شود، ۴٪ بهینه سازی بیشتر در روش مقاله وجود دارد. و برای بررسی اثر روش مقاوم از داده با خطای شکل (۹) استفاده شده است.



شکل ۶: نمودار شارژ باتری های برای کنترل کننده ی اولیه با حضور خطا در اطلاعات در مسیر UDDS



شکل ۷: نمودار شارژ باتری های برای کنترل کننده ی مقاوم با حضور خطا در اطلاعات در مسیر UDDS

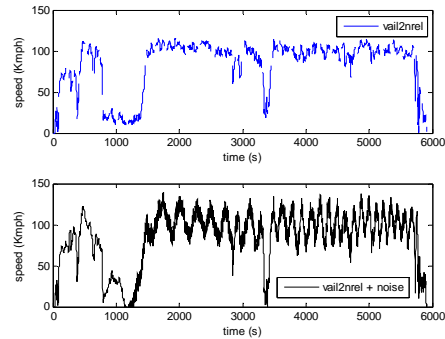
بنابراین روش مقاوم شده، عملکرد بسیار خوبی را در مقابل خطای بسیار زیاد در اطلاعات مسیر نشان می دهد.

مسیر vail2nrel

به سرعت مورد استفاده در محاسبات، مقاوم است. همچنین روش بهینه سازی اصلاح شده با پارامترهای طراحی قابل تنظیم می تواند روش اصلی را برای استفاده در محیط عملی قابل دسترس نماید و می توان یکی از اشکالات روش را به کمک آن تا حد زیادی رفع نمود. همچنین با استفاده از روش مقاوم و محاسبه ی مجدد نقطه ی تعادل در طی مسیر و وزن دهی به داده ها، روش، نسبت به خطای نسبتا بالا در اطلاعات مسیر مقاوم بوده و البته مصرف سوخت پایین تری نیز نسبت به سایر روش ها دارد.

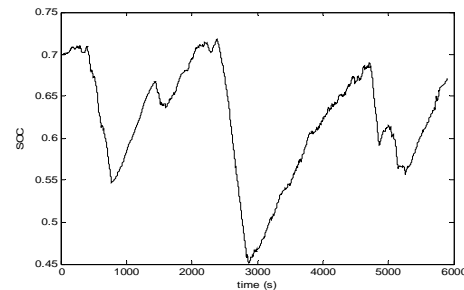
مراجع

- [1] C Mi, M. A Mansur and D. Wenzhong Gao, Hybrid Electric Vehicles principles applications with practical perspectives. John Wiley & Sons, 2011
- [2] M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric Hybrid Electric and fuel cell Vehicles Fundamentals theory and design. CRC press, 2010.
- [3] N.J. Schouten, M.A. Salman, and N A. Kheir, "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles" IEEEnTrans. Control system technology, Vol 10, No 3, pp. 460-468, 2002
- [4] X. Zhang and C. MiA, Vehicle Power Management Modeling, Control and Optimization. Springer , 2011.
- [5] A. Sciarretta, M Back and L Guzzella, "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transon Control System Technology, Vol. 12, No. 3, pp.352-363, 2004
- [6] P. Zhuang, Q. Shang "Model-Based Traffic Prediction Using SensorNetworks", 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, pp.136-140, 2008
- [7] B. Ganji and A. Z. Kouzani, "A Study on Look-ahead Control and Energy Management Strategies in Hybrid Electric Vehicles" 8th IEEE International Conference on Control and Automation, China, pp. 388-392, 2010
- [8] G.E. Katsargyri and V. Kolmanovsky, "Optimally Controlling Hybrid Electric Vehicles using Path Forecasting" American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, USA , pp. 4613-4617, 2009
- [9] T.S. Kim, C. Manzie and R. Sharma "Two-Stage Optimal Control of a ParallelHybrid Vehicle with Traffic Preview" 18th IFAC World Congress, Italy, pp. 2115-2120, 2011
- [10] C. Manzie , H. Watson and Saman Halgamuge, "Fuel economy improvements for urban driving:Hybrid vs. intelligent vehicles" Trans. Research Part C, 15pp.1-16, 2007,
- [11] K.B. Wipke, M.R. Cuddy and S.D. Burch "Advisor 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/ forward approach" IEEE Trans on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 6, pp. 1751-1761, 1999



شکل ۹: نمودار سرعت - زمان مسیر vail2nrel همراه با خطا در نرخ ترافیک

مصرف سوخت با روش تصحیح شده (باند تعادل موقت) و مقاوم، معادل ۴.۳ لیتر بر صد کیلومتر به دست آمده است و نمودار شارژ باتری ها نیز بهبود عملکرد این روش نسبت به روش بدون مقاوم سازی که در جدول ۳ آمده است را نشان می دهد.



شکل ۱۰: نمودار شارژ باتری های برای کنترل کننده ی مقاوم تصحیح شده با حضور خطا در اطلاعات در مسیر vail2nrel در آخرین قسمت از شبیه سازی، ترکیبی از تمام شبیه سازی های قبل آورده شده است. خطا در اطلاعات مسیر وجود دارد، روش مقاوم استفاده شده است و برای جلوگیری از نوسانات موتور احتراق داخلی از روش تصحیح شده با باند تعادل موقت استفاده شده است. نتایج شبیه سازی، عملکرد بسیار خوب این روش را هم در میزان مصرف سوخت و هم در بازگرداندن شارژ باتری ها به میزان اولیه (در مقایسه با جدول (۳) نشان می دهد.

۷- نتیجه گیری

شبیه سازی صورت گرفته در بخش قبل در دو سیکل حرکتی که مسیرهای درون شهری و مسیرهای بزرگراهی می باشند، نشان دهنده ی بهینه سازی بسیار مناسب روش معرفی شده در مقاله می باشد. مزایای این روش نسبت به روش معرفی شده در مرجع [۹] و بیشتر روش های بهینه سازی، سادگی و حجم محاسبات پایین آن می باشد. حتی در صورتی که روش اصلاح شده مورد استفاده قرار گیرد باز هم این روش ساده تر از روش های دیگر حتی روش های فازی می باشد. از مزایای دیگر روش، عدم وابستگی آن به داده های لحظه ای اطلاعات مسیر می باشد. بدین معنی که، در صورتی که اطلاعات مسیر خطایی نسبی نیز داشته باشد به دلیل این که این خطا در برخی نقاط باعث افزایش توان درخواستی و در برخی نقاط باعث کاهش توان درخواستی نسبت به میزان واقعی آن می شود، در میزان داده ی تجمعی تأثیر چندانی نخواهد داشت و در نتیجه در مقدار تعادل B نیز اثر قابل توجه ندارد. پس روش بهینه سازی به تغییرات نسبی در سرعت واقعی نسبت

