



مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

استراتژی مدیریت انرژی در خودروی هیبرید هیدرولیکی موازی

دانیال کریمی^{۱*}، امین حاجی زاده^۲ و علیرضا ارغوان^۳

کارشناس ارشد مکترونیک، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات سمنان

آستادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

چکیده

خودروی هیبرید هیدرولیکی شاخه مهمی از تکنولوژی هیبرید می‌باشد که دارای مزیت چگالی توان بالا و نرخ شارژ و تخلیه مقادیر عظیمی از انرژی است. از این رو این تکنولوژی برای خودروهای نیمه سنگین بسیار مناسب است. تقسیم توان میان دو منبع تولید توان در این خودرو، نیازمند استراتژی کنترلی خاصی برای بهبود مصرف سوخت و افزایش راندمان می‌باشد. استراتژی مدیریت انرژی، الگوریتمی است که توان را میان موتور احتراقی و موتور هیدرولیکی تقسیم می‌کند. در این مقاله از یک کنترل کننده فازی در راستای تامین اهداف کنترلی استفاده شده است. این اهداف شامل بهبود شرایط رانندگی و بهبود مصرف سوخت می‌باشد که توسط کنترل کننده فازی می‌توان مصالحه‌های میان تمام اجزای خودرو ایجاد کرد. در این مقاله ابتدا شرایط کاری خودروی هیبرید هیدرولیکی در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از یک استراتژی مناسب، عملکرد موتور احتراقی بر اساس تنظیم آن در شرایط بهینه کارکرد، تنظیم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که استراتژی مدیریت انرژی با استفاده از منطق فازی در خودروی هیبرید هیدرولیکی باعث بهبود مصرف سوخت و شرایط کاری خودرو می‌شود، بطوریکه ۳۹٪ افزایش صرفه جویی در سوخت مشاهده می‌گردد.

کلمات کلیدی: خودروی هیبرید هیدرولیکی؛ کنترل کننده منطق فازی؛ بهبود مصرف سوخت؛ استراتژی مبتنی بر قواعد.

Energy management strategy in parallel hydraulic hybrid vehicle

D. Karimi^{1,*}, A. Hajizadeh² and A. Arghavan³

¹ M.Sc Mechatronics, Islamic Azad University Science and Research Branch, Semnan, Iran

² Assistant Prof., Department of Electrical Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

³ Faculty member of Islamic Azad Univ., Semnan, Iran

Abstract

Hydraulic hybrid vehicle is an important branch of the hybrid technology. It has many advantages such as high power density, high recharge rates and huge amounts of energy evacuation. These aspects, has made this technology very suitable for semi-heavy vehicles. Power split between the two sources of power in this vehicle requires certain control strategy to improve fuel consumption rates and efficiency. Energy management strategy is an algorithm that divides power between combustion engine and hydraulic motor. In this paper, a fuzzy controller is used in order to meet the control objectives. These objectives include improving driving conditions and fuel consumption. By the use of a fuzzy controller we are able to create a compromise between all components of a vehicle. In this work, first, the operating conditions of a hybrid vehicle were considered and then by utilizing an appropriate strategy, combustion engine performance was set according to its optimal performance conditions. Simulation results showed that using the energy management strategy based on fuzzy logic resulted in improving fuel consumption rates and vehicle operating conditions, such that a 39% saving in fuel consumption were observed.

Keywords: Hydraulic hybrid vehicle; Fuzzy logic controller; Fuel economy; Rule base strategy.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۳۴۵۷۶۹۳؛ فکس: ۰۲۵۱۶۶۴۱۶۹۴

آدرس پست الکترونیک: danielkarimi@yahoo.com

۱- مقدمه

با افزایش آلاینده‌های محیطی در سرتاسر دنیا، ذخیره انرژی در خودروها به هدف بسیار مهمی تبدیل شده و کاهش مصرف سوخت خودروها نیز یکی از نیازهای ضروری در راستای رسیدن به محیطی پاک‌تر می‌باشد [۱ و ۲]. بعنوان شاخه‌ای از تکنولوژی هیبرید، خودروی هیبرید هیدرولیکی به نقطه مهمی برای تحقیقات خودروسازان تبدیل شده است. سیستم هیبرید هیدرولیکی، با ترکیب موتور احتراقی و پمپ/موتور هیدرولیکی دارای پتانسیل بهبود مصرف سوخت با استفاده از ترمزگیری بازتاب و کارکردن موتور احتراقی در نقاط بهینه می‌باشد. اکومولاتور هیدرولیکی دارای مزیت چگالی توان بالا و توانایی در دریافت نرخ بالای شارژ و تخلیه می‌باشد از این رو تکنولوژی هیبرید هیدرولیکی برای خودروهای سنگین و نیمه سنگین بسیار مناسب است [۳ و ۴]. تنظیم شرایط کاری و تقسیم توان بین دو منبع توان خودروی هیبرید هیدرولیکی در کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی بسیار موثر می‌باشد.

وو^۱ و همکارانش [۵] یک استراتژی مناسب برای خودروی سواری بر اساس تقسیم حجم اکومولاتور به دو بخش ارائه کردند که یک بخش برای بازتابی و بخش دیگر برای جدا کردن از شرایط جاده بود.

وو و لین و همکارانشان در پژوهش‌های جداگانه‌ای یک استراتژی مدیریت توان بهینه برای کامیون هیبرید هیدرولیکی بر اساس نتایج برنامه‌ریزی دینامیکی به کار گرفتند که در این استراتژی‌ها از پمپ/موتور برای تامین درخواست توان کلی استفاده کردند، با این وجود انرژی در اکومولاتور موجود است اما وقتی رانش در حالت موتور احتراقی در سرعت بالا انجام می‌شود از کار کردن موتور احتراقی در نواحی با راندمان پایین جلوگیری می‌شود.

در یک خودروی هیبرید هیدرولیکی در طی شتاب‌گیری، سیال از اکومولاتور فشار بالا به تانک فشار پایین حرکت کرده و باعث رانش موتور می‌شود. در جهت عکس، در حین ترمزگیری سیال از تانک به اکومولاتور پمپ شده و انرژی را درون اکومولاتور ذخیره می‌کند [۸-۱۱].

۲- مدل‌سازی دینامیکی خودروی هیبرید

برای شبیه‌سازی رفتار واقعی خودرو در راستای ارزیابی استراتژی مدیریت توان، باید مدل‌سازی دینامیکی به صورت کاملاً دقیق و با جزئیات زیاد فراهم باشد. در راستای ارزیابی رفتار خودروهای معمولی و هیبرید، درک صحیح مدل دینامیکی در اجزای زنجیره توان خودرو بسیار حیاتی است. این درک صحیح، به ارزیابی و فهم این‌که راندمان چگونه می‌تواند بهبود پیدا کند کمک می‌کند.

۲-۱- دینامیک خودرو

دینامیک خودرو، حرکت اجسام صلب (چرخ‌ها، اکسل‌ها و بدنه) را بیان می‌کند که اجازه دارند با در نظر گرفتن نیروها/ممان‌ها و قیود صلبیت در فضا حرکت کنند. نیروها/ممان‌ها المان‌های فیزیکی هستند که در نقطه خاصی به بدنه اعمال می‌شوند. همین‌طور بدنه با استفاده از قیود صلبیت می‌تواند فقط در جهات خاصی حرکت کند مثلاً یک چرخ، می‌تواند فقط حول یک محور دوران کند. خودرو در قسمت چرخ‌ها به خط رانش متصل شده است یعنی درست جایی که محور رانش به قاب چرخ‌ها اتصال پیدا کرده است.

روش‌های زیادی وجود دارد که می‌توان مدل دینامیک خودرو را بسته به اهداف شبیه‌سازی با استفاده از این روش‌ها ایجاد کرد. در این مقاله فرض می‌شود که جرم خودرو در مرکز wheelbase قرار گرفته است. چنین روشی می‌تواند پیشگویی دقیقی از سرعت و شتاب خودرو در جاده‌های نرم و هموار بدهد. البته اگر نیاز بود، می‌توان شرایط دیگری نظیر ناهمواری جاده، فرمان‌پذیری و... را نیز اضافه کرد.

توان درخواستی در چرخ‌ها با رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$P = [R_L + (M + M_r)a]V \quad (1)$$

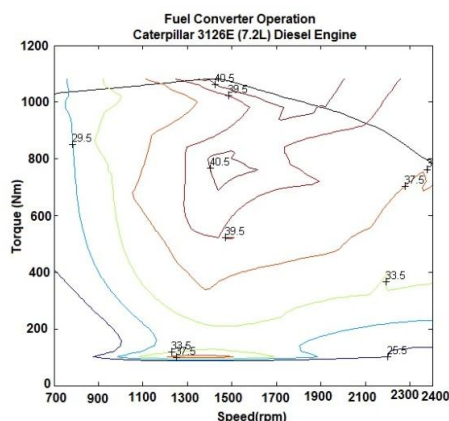
که در این رابطه P توان درخواستی در چرخ‌ها برای شتاب دادن به خودرو و غلبه بر درگ، مقاومت و نیروهای شیب‌روی می‌باشد. در رابطه (۱) سرعت خودرو V و شتاب a می‌باشد. بار جاده‌ای عبارتست از:

$$R_L = \frac{1}{2}\rho V^2 C_D A + fW + W \sin \theta \quad (2)$$

که جمله اول درگ ایرو دینامیکی، جمله دوم نیروی مقاومت غلتشی و جمله سوم نیروهای شیب‌روی می‌باشد.

¹ Wu

شده‌اند که موتور احتراقی روی منحنی بازده ماکزیمم خود کار کند تا مصرف سوخت به بهترین شکل ممکن کنترل شود.



شکل ۱- نمودار مصرف ویژه سوخت موتور احتراقی

۲-۴- مدل دینامیکی اجزای هیدرولیکی

واحد پمپ/موتور هیدرولیکی وسیله تبدیل انرژی جهت‌داری است که در حالت پمپ، پمپ/موتور هیدرولیکی انرژی جنبشی را از حرکت ترمزی خودرو به انرژی هیدرولیکی تبدیل کرده و در اکومولاتور فشار بالا ذخیره می‌کند. در حالت موتور نیز، پمپ/موتور هیدرولیکی انرژی هیدرولیکی را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند تا کمک به شتاب‌گیری کند. پمپ/موتور هیدرولیکی، محوری و با جابجایی متغیر است.

۲-۴-۱- مدل دینامیکی پمپ/موتور هیدرولیکی

مدل‌سازی با معادله‌ای برای دبی حجمی ایده‌آل در پمپ/موتور شروع می‌شود.

$$P_h = T_h \omega_h \quad (8)$$

T_h گشتاور پمپ/موتور هیدرولیکی و ω_h سرعت زاویه‌ای آن است.

$$\omega_h = N_f N_h \omega_w \quad (9)$$

$$T_h = \Delta P \cdot D \quad (10)$$

ΔP اختلاف فشار در پمپ/موتور است:

$$\Delta P = P_{high} - P_{low} \quad (11)$$

در انتها نیز دبی حجمی پمپ/موتور محاسبه می‌گردد.

$$Q = \omega_h \cdot D \quad (12)$$

۲-۲- مدل دینامیکی موتور احتراقی

در این مقاله، نمونه مدل پیچیده نمی‌باشد و از مدل ترمودینامیکی برای محاسبه راندمان، از مدل اصطکاکی برای محاسبه توان اصطکاکی و از مدل گشتاور برای محاسبه گشتاور تشکیل شده است. هدف مدل موتور احتراقی محاسبه مصرف سوخت و بهبود آن است. در محاسبه مصرف سوخت، نسبت دبی جرمی سوخت در موتور احتراقی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_f = \frac{P_e + P_{e,fric}}{\eta \eta_{ce} Q_{LHV}} \quad (3)$$

که P_e توان خروجی موتور احتراقی، $P_{e,fric}$ توان اصطکاکی تولید شده توسط اجزای محرک کنار موتور احتراقی، η_{ce} راندمان سوخت و Q_{LHV} کمترین مقدار گرمای سوخت دیزل است. وقتی دبی جرمی سوخت معین شد، صرفه‌جویی در سوخت لحظه‌ای با رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$FE = \frac{V}{\dot{m}_f \rho_f} \quad (4)$$

در مدل سیمولینک، در هر پله زمانی برنامه به محاسبه محدوده گشتاور با این معادله و مقایسه آن با گشتاور درخواستی واقعی می‌پردازد. گشتاور واقعی T_e عبارتست از:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_e} \quad (5)$$

که ω_e سرعت دورانی موتور احتراقی است.

$$\omega_e = N_f N_t \omega_w \quad (6)$$

و ω_w سرعت دورانی چرخ‌هاست.

$$\omega_w = \frac{V}{r_w} \quad (7)$$

T_w نیز شعاع چرخ‌ها می‌باشد.

۲-۳- موتور احتراق داخلی

در شبیه‌سازی خودروی هیبرید هیدرولیکی موازی در این پژوهش از نمونه واقعی موتور احتراقی کاتریپلار 3126E استفاده شده است که در حال حاضر بر روی خودروهای سنگین به وفور کار گذاشته می‌شود. نمودار مصرف ویژه سوخت این موتور احتراقی در شکل ۱ نشان داده شده است. در بحث پیاده‌سازی قواعد فازی و استفاده از موتور احتراقی در کنار موتور هیدرولیکی نیز قواعد به گونه‌ای در نظر گرفته

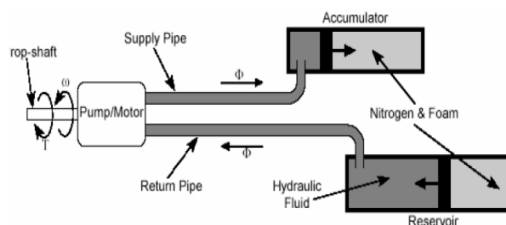
۲-۵- سیستم ترمزگیری بازیافت

بخش مهمی از سوخت خودرو در طی عمل شتاب‌گیری از حالت سکون، مصرف می‌شود و پس از آن انرژی جنبشی خودرو توسط نیروهای مقاوم و ترمزهای اصطکاکی در کاهش سرعت‌های متوالی به هدر می‌رود که به هدر رفتن این انرژی باعث مصرف زیاد سوخت خودرو می‌شود. یک روش برای بهبود مصرف سوخت، بازیافت و ذخیره انرژی خودرو در طی عمل ترمزگیری و استفاده مجدد از آن در طی شتاب‌گیری است. فرایند ذخیره انرژی جنبشی به ترمزگیری بازیافت مشهور است. می‌توان گفت ترمزگیری بازیافت می‌تواند تقریباً تمام انرژی به هدر رفته در طول ترمزگیری را بازیافت و ذخیره کرده و باعث بهبود مصرف سوخت خودرو شود. در راستای اجرای صحیح و موفق عمل ترمزگیری بازیافت روی خودرو، نیازمند سیستم خاصی برای بازیافت، ذخیره و رهاسازی سیستم هستیم. تا به امروز، چندین گزینه برای ترمزگیری بازیافت برای استفاده روی خودروها پیاده سازی شده است. یک روش شامل استفاده از ژنراتور برای تبدیل انرژی مکانیکی خودرو به انرژی الکتریکی در طی ترمزگیری و ذخیره آن به صورت شیمیایی در باتری است. زمانی که این انرژی مورد نیاز باشد، ژنراتور انرژی ذخیره شده را از باتری گرفته و توان رانشی اضافی برای خودرو فراهم می‌کند. روش دیگر، ذخیره انرژی به صورت مکانیکی در دیسک دوار (فلاپویل) است. این روش نیازمند ابزاری برای افزایش سرعت فلاپویل در زمان کاهش سرعت خودرو جهت ذخیره انرژی است. هر روش برای بازیافت انرژی جنبشی، باید گشتاوری در سیستم محرکه خودرو ایجاد کند تا در خودرو نیروی رانشی اضافی ایجاد شود. در پژوهش پیش‌رو، از سیستم هیدرولیکی برای بازیافت انرژی جنبشی خودرو استفاده شده است. انرژی جنبشی‌ای که طی عمل ترمزگیری گرفته می‌شود، در اکومولاتور فشار بالا ذخیره شده و برای استفاده در شتاب‌گیری بکار می‌رود. سیستم هیدرولیکی ذخیره انرژی به این صورت کار می‌کند که سیال فشار بالا را در اکومولاتور ذخیره کرده تا بعداً جهت استفاده آن‌ها را کند. اجزای هیدرولیکی مورد نیاز عبارتند از: پمپ/موتور هیدرولیکی، مخزن ذخیره فشار بالا (اکومولاتور) و تانک فشار پایین. اکومولاتور فشار بالا مخزنی است که سیال هیدرولیکی ذخیره شده را در فشار بالا نگه می‌دارد. سیستم ذخیره انرژی اکومولاتور نیاز به تانک

D جابجایی پمپ/موتور هیدرولیکی با واحد cm^3 است که در بازه $(-D_{\max} \sim D_{\max})$ قرار دارد. D_{\max} نیز ماکزیمم جابجایی پمپ/موتور هیدرولیکی است. در این مدل جابجایی D در حالت موتوری مثبت و در حالت پمپ منفی است. از این‌رو، T_h و Q می‌توانند مثبت یا منفی باشند. پمپ/موتور هیدرولیکی با استفاده از اکومولاتور به حرکت در می‌آید و در این مدل فشار و دبی حجمی از اکومولاتور وارد پمپ/موتور می‌شود.

۲-۴-۲- سیستم شارژ انرژی (اکومولاتور هیدرولیکی)

اکومولاتورها به عنوان مخازن ذخیره انرژی استفاده می‌شوند. اکومولاتور بر این اساس استوار است که گاز، تراکم پذیر و روغن، تراکم ناپذیر است. روغن در اکومولاتور جریان می‌یابد و با کاهش حجم خود گاز را فشرده می‌کند. انرژی توسط حجم سیال هیدرولیکی ذخیره می‌شود که گاز تحت فشار را متراکم کرده بود. اگر سیال آزاد شود، به سرعت تحت فشار گاز منبسط شده به سمت بیرون جریان می‌یابد. رابطه میان پمپ/موتور هیدرولیکی و اکومولاتور هیدروپنوماتیکی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل پیداست، پمپ/موتور وسیله دوجبهته‌ای برای تبادل انرژی می‌باشد. در حالتی که خودرو در حال ترمزگیری است پمپ/موتور به صورت پمپ عمل کرده و سیال هیدرولیکی را از تانک به سمت اکومولاتور حرکت می‌دهد که با این حرکت سیال، انرژی درونی گاز افزایش یافته و انرژی در اکومولاتور ذخیره می‌گردد. در حالت عکس یعنی در حالت شتاب‌گیری نیز به دلیل اختلاف فشار بین اکومولاتور و تانک، سیال از اکومولاتور به سمت تانک حرکت کرده و پمپ/موتور به صورت موتور کار می‌کند و انرژی را به سیستم محرکه خودرو تحویل می‌دهد.



شکل ۲- رابطه میان پمپ/موتور هیدرولیکی و اکومولاتور

۵- حالت ترمزگیری بازیافت: در طی ترمزگیری خودرو، موتور هیدرولیکی تبدیل به پمپ شده و با بازیابی انرژی جنبشی به شارژ اکومولاتور می‌پردازد (مسیر ۴).

در راستای اجرای صحیح مدل‌سازی از مدل‌های موجود در ADVISOR [۱۲] برای شبیه‌سازی خودروی هیبرید هیدرولیکی در محیط نرم افزار متلب/ سیمولینک استفاده شده است.

برای ساختن استراتژی مناسبی که این حالات کاری را تعویض کند، باید شرایط گذرای بین این حالات کاری در نظر گرفته شود. پارامترهای زیادی در تصمیم‌گیری برای انتخاب حالت کاری مناسب مثل زمان خاموشی موتور احتراقی، میزان شارژ موجود در اکومولاتور و ... تاثیرگذار است. مثلا اگر میزان شارژ موجود در اکومولاتور پایین باشد، موتور احتراقی به تنهایی باید توان رانشی خودرو را فراهم کرده و علاوه بر آن باید پمپ هیدرولیکی را نیز به کار اندازد تا شارژ مجدد در اکومولاتور انجام شود (حالت چهارم).

۴- استراتژی مدیریت انرژی

در این بخش استراتژی کنترل گشتاور تشریح می‌شود. توزیع گشتاور در سیستم تحت سه قاعده مدیریت خواهد شد:

۱- درخواست راننده (پدال گاز و ترمز) باید به درستی تامین شود.

۲- راندمان اجزای خودرو (موتور احتراقی، پمپ/ موتور هیدرولیکی، سیستم انتقال قدرت و اکومولاتور) در طی شبیه‌سازی کاهش پیدا نکند.

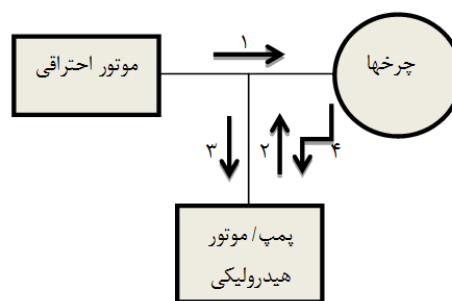
۳- میزان شارژ اکومولاتور از مقدار آستانه تعیین شده، کمتر نشود.

وقتی خودروی هیبرید هیدرولیکی در حال کار است، استراتژی کنترل گشتاور مورد نیاز است تا تعیین کند چه میزان گشتاور برای رانش خودرو و چه میزان برای شارژ اکومولاتور مورد نیاز است. سپس این نیاز گشتاور بین موتور احتراقی و موتور هیدرولیکی تقسیم می‌شود. به منظور پیاده سازی استراتژی توزیع گشتاور، حالات کاری خودرو باید به درستی شناخته شود.

فشار پایینی دارد تا سیالی که درون اکومولاتور نمی‌باشد را نگهداری کند. این تانک باید دارای حجم معینی باشد تا به اکومولاتور اجازه دهد تا به فشار بیشینه برسد.

۳- حالات کاری خودروی هیبرید هیدرولیکی

در راستای پیاده‌سازی صحیح قواعد کنترلی در کنترل کننده فازی، شناخت حالات کاری در خودروی هیبرید هیدرولیکی مورد نیاز است. این حالات کاری در شکل ۳ نشان داده شده و به شرح زیر می‌باشند:

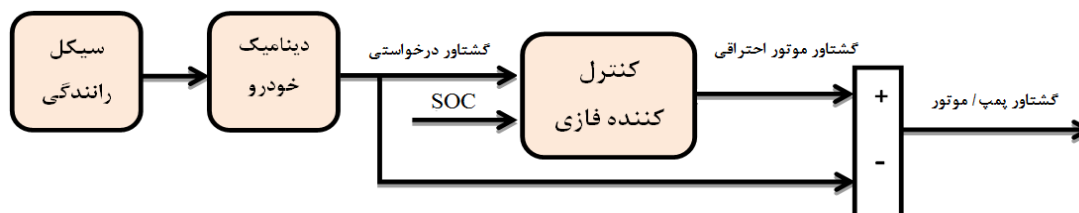


شکل ۳- حالات کاری خودروی هیبرید هیدرولیکی

۱- فقط موتور احتراقی: در خودروی هیبرید هیدرولیکی شرایطی پیش می‌آید که شارژ اکومولاتور تخلیه شده و هیچ انرژی در آن موجود نمی‌باشد. در این حالت فقط موتور احتراقی، تمام گشتاور درخواستی را فراهم می‌کند (مسیر ۱).
۲- فقط موتور هیدرولیکی: اگر گشتاور درخواستی کم باشد، موتور هیدرولیکی تمام توان درخواستی را برای رانش فراهم می‌کند (مسیر ۲).

۳- حالت ترکیبی (هیبرید): در صورتی که گشتاور درخواستی بالا بوده و موتور هیدرولیکی به تنهایی قادر به تامین تمام گشتاور درخواستی نباشد، موتور احتراقی به کمک آن آمده و کسری گشتاور را تامین می‌کند (مسیر ۱ و ۲).

۴- حالت شارژ مجدد: اگر شارژ اکومولاتور به مقدار بسیار کم افت کند و توان درخواستی کمتر از توان موجود موتور احتراقی باشد، در این صورت موتور احتراقی پمپ هیدرولیکی را فعال کرده و اکومولاتور را شارژ می‌کند (مسیر ۳).



شکل ۴- استراتژی کنترل فازی توزیع گشتاور

۴-۱- استراتژی تقسیم گشتاور

بر اساس گشتاور خروجی موجود، وضعیت پدال به گشتاور درخواستی T_{req} تغییر می‌کند. اگر $T_{req} < 0$ یعنی ترمزگیری بازیاب، که در این حالت استراتژی کنترلی تا جایی که امکان دارد انرژی ترمزگیری را بازیابی می‌کند. در ضمن ترمزهای اصطکاکی در نظر گرفته شده تا وقتی اکومولاتور پر شد، برای کاهش سرعت خودرو طبق درخواست راننده عمل می‌کنند. اگر $T_{req} > 0$ باشد، گشتاور درخواستی بین موتور احتراقی و پمپ/موتور هیدرولیکی تقسیم می‌شود:

$$T_{req} = T_{P/M} + T_{ICE} \quad (۱۳)$$

T_{ICE} گشتاور خروجی موتور احتراقی است. $T_{P/M}$ نیز گشتاور خروجی پمپ/موتور هیدرولیکی می‌باشد که این گشتاور در حالت کارکرد موتوری مثبت و در حالت کارکرد پمپ، منفی است.

۵- کنترل کننده فازی

کنترل کننده منطق فازی با جابجایی منطق بولین و پارامترهای دقیق با منطق فازی و پارامترهای فازی ساخته می‌شود [۱۳ و ۱۴]. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، کنترل کننده فازی، بخش اصلی آن می‌باشد. ایده اصلی کنترل کننده فازی این است که دانش انسان براساس مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه فازی پیاده سازی می‌شود. در این مقاله از سیستم استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است. ساختار پایه سیستم‌های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می‌شود. بخش اول، قواعدی هستند که شامل گزینشی از قواعد فازی می‌باشد. بخش دوم، پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی در قالب آن تعریف می‌شوند. در نهایت، بخش سوم ساز و کار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد و حقایق

موجود، برای رسیدن به خروجی معقول صورت می‌پذیرد. قواعد فازی مورد استفاده در این سیستم استنتاج با توجه به تجارب انسانی، فراهم آورده شده‌اند.

۵-۱- توابع عضویت

ورودی‌های قطعی توسط فرایند فازی‌سازی به فازی تبدیل می‌شوند که این فازی‌سازی با استفاده از توابع عضویتی انجام می‌شود که در زیر شرح داده خواهد شد. کنترل کننده فازی از دو ورودی استفاده می‌کند: میزان شارژ اکومولاتور و گشتاور درخواستی. بر اساس این دو ورودی، نقاط کاری موتور احتراقی تنظیم می‌شود. توابع عضویت ورودی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

۵-۲- قواعد فازی

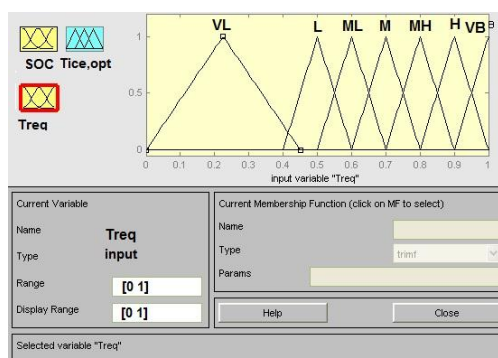
قواعد فازی به شش بخش تقسیم می‌شوند:

- ۱- اگر $SOC = Low$ باشد، اکومولاتور باید شارژ شود. خصوصاً وقتی SOC به اندازه $VeryLow$ کاهش می‌یابد، شارژ اکومولاتور در اولویت قرار گرفته و در نتیجه با این قاعده، SOC به سرعت به سطح مطلوب می‌رسد.
- ۲- اگر T_{req} به مقدار $VeryLow$ کاهش یابد موتور احتراقی بسیار ناکارآمد کار کرده و در نتیجه باید موتور احتراقی خاموش شده و موتور هیدرولیکی به تنهایی گشتاور را تامین کند.
- ۳- اگر T_{req} مقداری کمتر از $T_{ice,opt}$ شود، موتور هیدرولیکی به عنوان پمپ کار می‌کند تا بار اضافی ایجاد کرده و اکومولاتور را شارژ کند و نقاط کاری موتور احتراقی را تا مقادیر منحنی راندمان بهینه موتور احتراقی افزایش دهد.
- ۴- اگر T_{req} به $T_{ice,opt}$ نزدیک شود، موتور احتراقی با راندمان بسیار خوبی کار می‌کند. در این حالت هیچ بار اضافه سنگینی نباید افزوده شود زیرا اگر بار افزوده شود راندمان را خراب می‌کند.

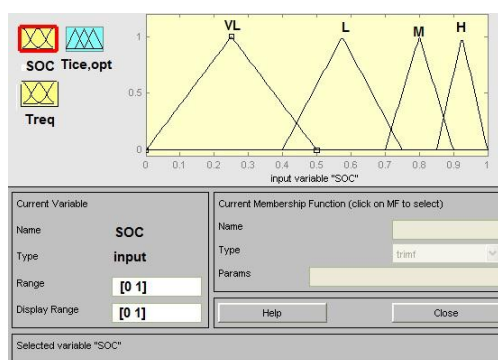
احتراقی و گشتاور کمکی از طرف پمپ/ موتور هیدرولیکی، میزان شارژ اکومولاتور به دست می‌آید که در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده‌اند. وقتی گشتاور درخواستی مثبت است، میزان شارژ اکومولاتور کاهش یافته و وقتی منفی است، یعنی ترمزگیری بازیافت، و در این حالت است که اکومولاتور شارژ می‌شود. بعلاوه وقتی گشتاور موتور احتراقی بیش از گشتاور درخواستی راننده است، نیز طبق رابطه (۱) اکومولاتور شارژ می‌شود. با استفاده از سیکل رانندگی و دینامیک خودرو، گشتاور درخواستی از طرف راننده به دست می‌آید. این گشتاور دو نوع فرمان را صادر می‌کند: فرمان شتاب یا گشت-زنی خودرو (که در این حالت فرمان گشتاور مثبت ارسال می‌شود) و فرمان ترمزگیری (که در این حالت فرمان گشتاور منفی ارسال خواهد شد). با شبیه‌سازی خودروی هیبرید هیدرولیکی، ابتدا در کنترل کننده فازی فرمان‌های مثبت و منفی شناسانده شده و سپس کنترل کننده تصمیم می‌گیرد که بر طبق درخواست راننده و میزان شارژ موجود در اکومولاتور، فرمان گشتاور مورد نیاز از طرف موتور احتراقی را برای رانش خودرو ارسال کند. سپس این میزان گشتاور موتور احتراقی از گشتاور درخواستی کم می‌شود تا میزان کمک از طرف گشتاور پمپ/ موتور هیدرولیکی به دست آید.

به منظور تحلیل بیشتر استراتژی کنترل پیشنهادی، ابتدا یک خودروی معمولی شبیه‌سازی شده و سپس مصرف سوخت آن جهت مقایسه به دست آمد که $21.65 \text{ L}/100\text{Km}$ را نشان می‌داد. پس از آن یک سیستم هیدرولیکی به همان خودروی معمولی در زنجیره توان خودرو اضافه شد و به خودروی هیبرید هیدرولیکی موازی تبدیل شد.

در شکل ۱۲ دور موتور احتراق داخلی نشان داده شده است و می‌توان مشاهده کرد در جاییکه از طرف کنترل کننده فازی فرمان کار موتور احتراقی صادر شده است، موتور احتراقی شروع به کار کرده و در جاییکه فرمان کار موتور هیدرولیکی صادر شده است، موتور احتراقی یا به حالت کار درجا درآمده و یا برای جلوگیری از مصرف سوخت زیاد خاموش شده است.



شکل ۵- توابع عضویت ورودی اول

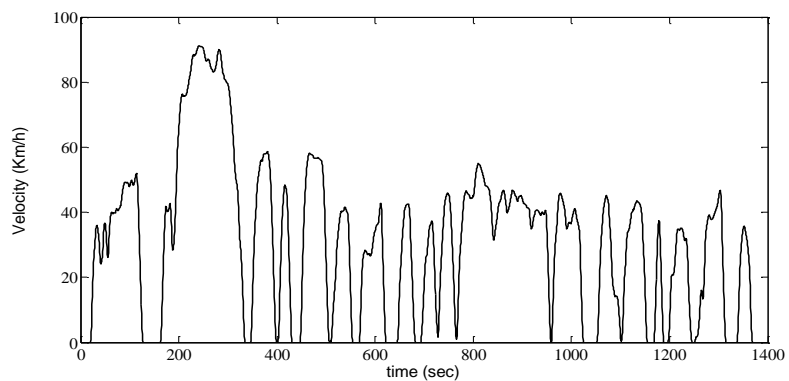


شکل ۶- توابع عضویت ورودی دوم

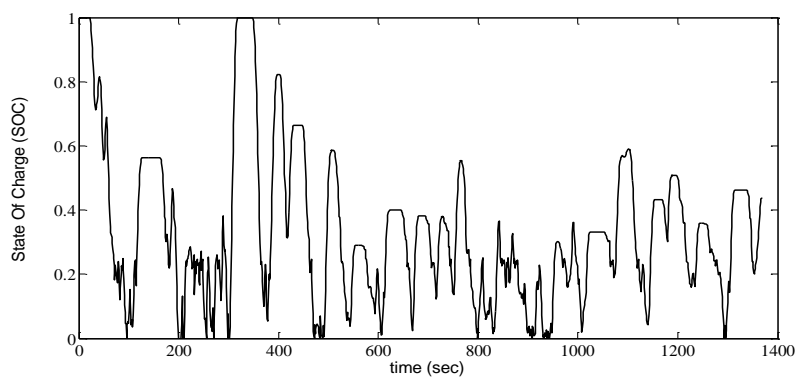
۵- اگر T_{req} بزرگتر از $T_{ice,opt}$ شود، دقیقاً مشابه حالت ۳، مگر این‌که گشتاور خروجی موتور هیدرولیکی مثبت باشد.
۶- اگر T_{req} به مقدار VeryHigh رسید، تمام گشتاور باید موجود باشد تا نیاز راننده فراهم شود، بدون در نظر گرفتن راندمان.

۶- نتایج شبیه‌سازی

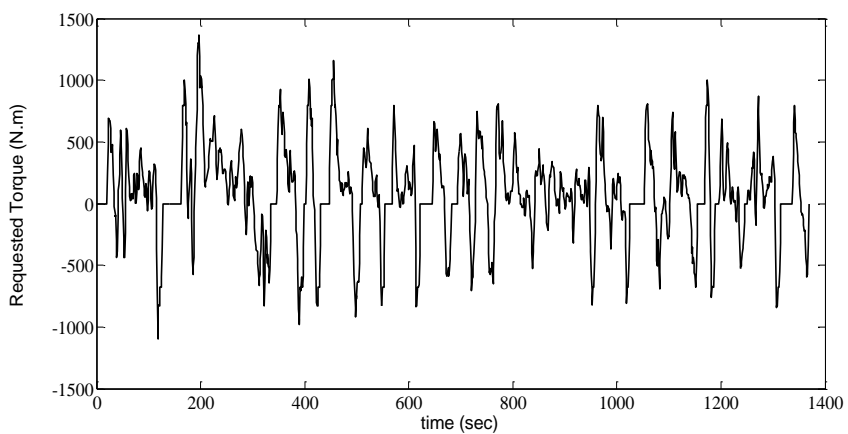
در این بخش، نتایج مطالعه روی استراتژی مدیریت انرژی خودروی هیبرید هیدرولیکی بیان خواهد شد. شبیه‌سازی تحت سیکل رانندگی UDSS انجام شده که در شکل ۷ نشان داده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در استراتژی کنترلی به عنوان متغیر در بلوک‌های سیمولینک به کار رفته‌اند. با استفاده از سیکل ذکر شده و بدست آوردن گشتاور موتور



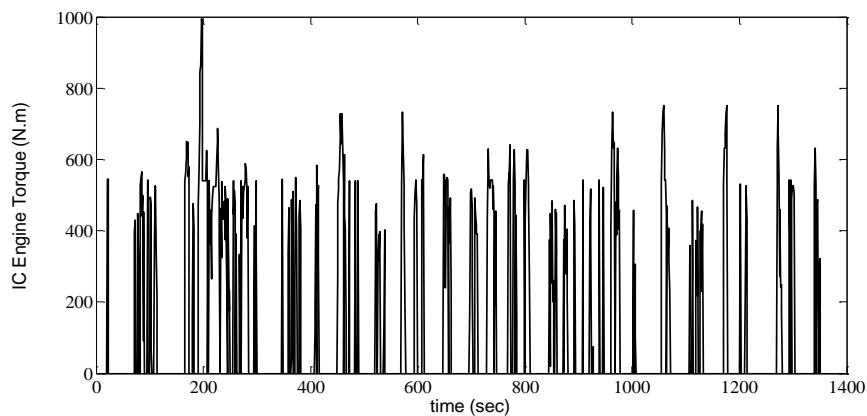
شکل ۷- سیکل رانندگی UDDS



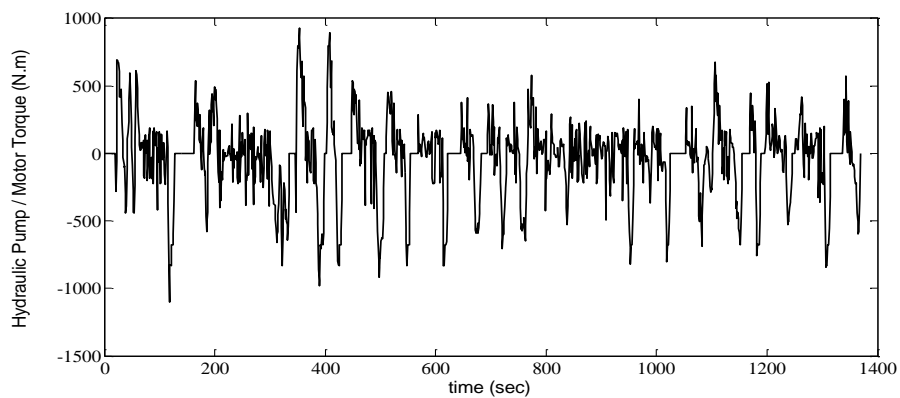
شکل ۸- میزان شارژ اکومولاتور (SOC)



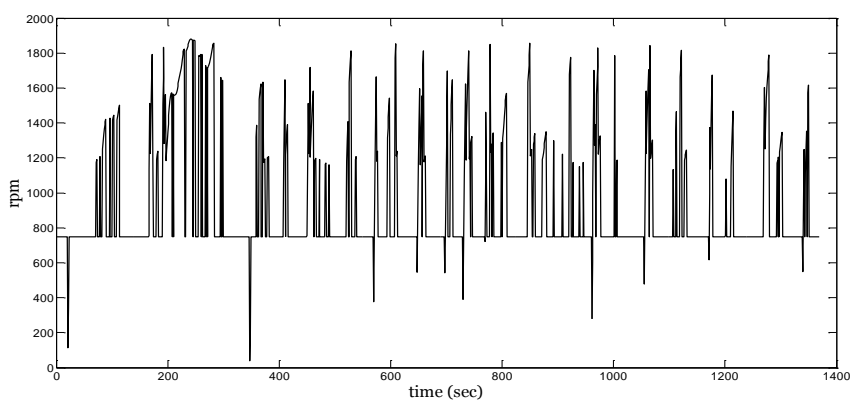
شکل ۹- گشتاور درخواستی از طرف راننده



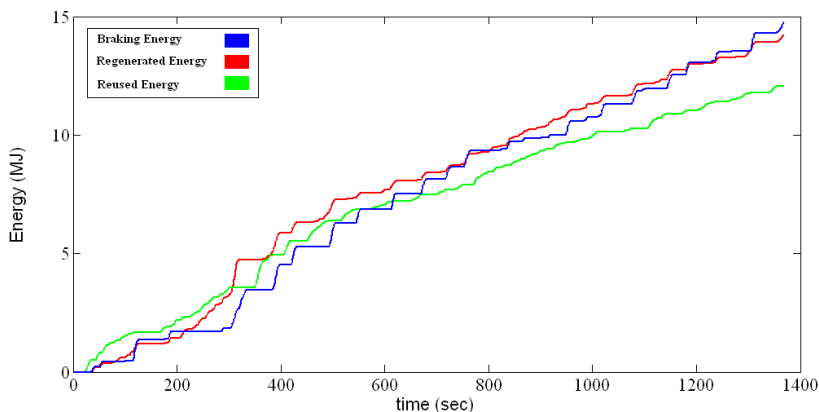
شکل ۱۰- گشتاور موتور احتراقی



شکل ۱۱- گشتاور پمپ / موتور هیدرولیکی



شکل ۱۲- دور موتور احتراقی



شکل ۱۳- انرژی ترمزگیری، بازیافت و مصرف شده

انرژی ترمزگیری (فرمان توان منفی از طرف راننده)، E_{h-} انرژی بازیافت شده (انرژی جذب شده سیستم هیدرولیکی) و E_{h+} میزان استفاده انرژی از این انرژی بازیافت شده (انرژی خروجی سیستم هیدرولیکی) می‌باشد.

جدول ۲- بررسی انرژی در مدل فازی ممدانی

نوع انرژی	میزان انرژی
$E_{required} = E_{r+}$	33.2×10^6
$E_{engine} = E_e$	21.6×10^6
$E_{braking} = E_{r-}$	14.7×10^6
$E_{reused} = E_{h+}$	11.6×10^6
$E_{regenerated} = E_{h-}$	14×10^6

از اینرو بر طبق سیکل مورد استفاده و سیستم استنتاج فازی ممدانی می‌توان گفت:

- ✓ ۶۵٪ انرژی رانندگی توسط موتور احتراق داخلی تامین می‌شود $(\frac{E_e}{E_{r+}} \times 100\%)$.
- ✓ ۳۵٪ انرژی رانندگی توسط سیستم هیدرولیکی تامین می‌شود $(\frac{E_{h+}}{E_{r+}} \times 100\%)$.
- ✓ ۹۵٪ انرژی ترمزگیری توسط سیستم هیدرولیکی جذب شده و در اکومولاتور ذخیره می‌گردد $(\frac{E_{h-}}{E_{r-}} \times 100\%)$.

بررسی خودروی هیبرید هیدرولیکی نشان می‌دهد که مصرف سوخت این خودرو پس از اعمال استراتژی مدیریت انرژی با کنترل کننده فازی ۱۵.۵۸L/100Km می‌باشد که با مقایسه این دو عدد متوجه بهبود ۳۹ درصدی در مصرف سوخت خواهیم شد. این نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقایسه مصرف سوخت

درصد بهبود	خودروی هیبرید هیدرولیکی	خودروی معمولی
۳۹٪	۱۵.۵۸	۲۱.۶۵

با بررسی جدول ۱ این نتیجه به دست می‌آید که راندمان و مصرف سوخت خودروی هیبرید هیدرولیکی به شدت به استراتژی کنترلی آن وابسته بوده و با یک استراتژی بهینه می‌توان مصرف سوخت خودروی هیبرید هیدرولیکی را بهبود دوچندانی داد.

پس از انجام شبیه‌سازی و به دست آوردن میزان مصرف سوخت بهینه، میزان انرژی ترمزگیری، انرژی بازیافت شده و همینطور میزان استفاده از این انرژی بازیافت شده را می‌توان به دست آورد. شکل ۱۳ نمودار انرژی خودروی هیبرید هیدرولیکی موازی با استراتژی منطق فازی با مدل ممدانی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نیز نشان دهنده انرژی موجود در سیکل است. در جدول ۲، E_{r+} انرژی کلی موجود در سیکل رانندگی، E_e انرژی خروجی موتور احتراقی به شفت خروجی خودرو، E_{r-}

- [3] Paul M, Jacek S (2003) Development and simulation of a hydraulic hybrid powertrain for use in commercial heavy vehicles. SAE Paper No.2003-01-3370.
- [4] Hewko LO, Weber TR (1990) Hydraulic energy storage based hybrid propulsion system for a terrestrial vehicle. Energy Convers EngConf:99-105.
- [5] Wu P, Luo N, Fronczak FJ, Beachley NH (1985) Fuel economy and operating characteristics of a hydropneumatic energy storage automobile. SAE Paper transaction.. 115-124.
- [6] Wu B, Lin CC, Filipi Z, Peng H, Assanis D (2004) Optimal power management for a hydraulic hybrid delivery truck. Vehicle SystDyn 2004:23-40.
- [7] Lin CC, Peng P, Jessy W (2003) Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. IEEE Trans Control SystTechnol:839-49.
- [8] Kim YJ, Filipi Z (2007) Series hydraulic hybrid propulsion for a light truck-optimizing the thermostatic power management. SAE Paper No. 2007-24-0080.
- [9] Robyn AJ, Paul S, Steven B (2005) Physical system model of a hydraulic energy storage device for hybrid powertrain applications. SAE Paper No. 2005-01-0810.
- [10] Hiroki S, Shigeru I, Eitaro K (2004) Study on hybrid vehicle using constant pressure hydraulic system with flywheel for energy storage. SAE Paper No. 2004-01-3064.
- [11] Kepner RP (2002) Hydraulic power assist-aemonstration of hydraulic hybrid vehicle regenerative braking in a road vehicle application. SAE Paper No. 2002-01-3128.
- [12] Wipke KB, Cuddy MR, Burch SD, (1999) ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a combined Backward/Forward Approach. IEEE transactions on vehicular technology 48(6). 1751-1761
- [13] Lee CC (1990) Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 20: 404-418.
- [14] Constantin V (2009) Properties of fuzzy systems. WSEAS Transactions on Systems 8: 210-228.

- ✓ ۸۳٪ انرژی جذب شده برای رانش خودرو استفاده می‌شود $\left(\frac{E_{h+}}{E_{h-}} \times 100\%\right)$.
- ✓ ۷۹٪ راندمان چرخ تا چرخ خودرو می‌باشد $\left(\frac{E_{h+}}{E_{r-}} \times 100\%\right)$.

همانگونه که ملاحظه می‌شود بخش قابل توجهی از انرژی ترمزگیری که در خودروهای معمولی به هدر می‌رود، با استفاده از استراتژی ذکر شده به چرخه رانشی خودرو باز پس داده می‌شود از این‌رو راندمان خودرو نیز به ۷۹٪ می‌رسد که برای یک خودروی سنگین رقم قابل توجهی می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی استراتژی مدیریت انرژی در خودروی هیبرید هیدرولیکی پرداخته شد. در این راستا ابتدا حالات کاری خودرو تعیین شد و دینامیک خودرو و سیکل رانندگی در نرم افزار سیمولینک وارد شد. پس از شبیه‌سازی، گشتاور درخواستی از طرف راننده که همان فرمان پدال گاز و ترمز می‌باشد به دست آمد. سپس با استفاده از کنترل کننده منطق فازی، گشتاور بهینه موتور احتراقی و گشتاور کمکی پمپ/موتور هیدرولیکی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که با گذر از خودروی معمولی به خودروی هیبرید هیدرولیکی بهبود خوبی در مصرف سوخت مشاهده می‌شود به طوری که شبیه سازی و مقایسه مصرف سوخت دو خودرو، ۳۹٪ بهبود را نمایان می‌کند.

مراجع

- [1] Wei YJ (2006) Study on a new type of hydraulic hybrid sport utility vehicle. China MechEng17(15):1645-8 (in Chinese).
- [2] Peng D, Yin CL, Zhang JW (2006) Advanced braking control system for hybrid electric vehicle using fuzzy control logic. SAE Paper No. 2006- 01-3583.