

استراتژی کنترل هوشمند در خودروهای هایبرید پیل سوختی

امین حاجی‌زاده^۱

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

aminhajizadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، راهکار کنترل به منظور بهینه سازی پخش توان در خودروی هایبرید پیل سوختی ارائه شده است. در ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی در نظر گرفته شده، پیل سوختی، باتری، موتور الکتریکی و نیرو محرکه خودرو در نظر گرفته شده است. روش مدیریت توان لحظه ای بر پایه کنترل کننده فازی عصبی بین دو منبع تولید توان پیل سوختی و باطری است. استراتژی کنترل پیشنهاد شده بر پایه روش هوشمند تمامی مدهای عملکردی ممکن در خودروی پیل سوختی را در نظر گرفته، می تواند جهت گیری راننده را تخمین یزند. نتایج شبیه سازی روی یک سیکل رانشی نشان می دهد که شاخص های عملکردی خودروی هایبرید پیل سوختی، نظیر حالت های شارژی باتری و ضریب بهره برداری سوخت در پیل سوختی در محدوده مناسبی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: باتری، پیل سوختی، خودروی هایبرید، کنترل فازی، شبکه عصبی، مدیریت توان.

۱- مقدمه

مکانیکی است. جنبه منحصر بفرد خودروی مورد نظر، استفاده از پیل سوختی PEM به عنوان منبع اصلی توان است. خودروهای هایبرید برقی با بهره گیری از دو منبع انرژی برای رانش خودرو، دارای ساختار پیچیده تری هستند. خودروی هایبرید، سیستم ترکیب شده ای از چندین زیر سیستم شامل پیل سوختی، سیستم انتقال، موتور الکتریکی، باتری، کلاچ، ترمز و است. هر زیرسیستم خود سیستم پیچیده ای بوده که عملکرد و مشخصه مربوط به خودش را دارد. از طرفی دیگر، لازم است تا همه زیر سیستم ها به صورت بهینه برای دستیابی به اهداف مختلف هماهنگ شوند. کنترل یک خودروی هایبرید، شامل فرآیندهای کنترلی پیچیده ای، نظیر تنظیم درجه سوخت یا کنترل ترمز براساس تغییرات محیطی خارجی و انتظارات راننده است که این عوامل غیر قابل پیش بینی بوده، می توانند به عنوان حوادث گسسته شناخته شده باشند. از طرفی، تقسیم توان بین دو منبع انرژی برای دستیابی به شاخص های کیفی، نظیر کاهش مصرف سوخت و قرار گیری نقاط کار هر یک از اجزای موتور احتراقی و موتور الکتریکی و باتری در ناحیه بهینه نیز نیازمند به کارگیری برخی از روندهای تصمیم گیری پیچیده است. این فرآیندها

در دهه گذشته استفاده از خودروهای هایبرید برقی پیل سوختی رشد چشمگیری داشته است. این خودرو راهی برای کاهش آلودگی در تجهیزات صنعتی، کاهش مصرف سوخت فسیلی و کاهش هزینه های عملکرد در سیستم های حمل و نقل است. پیل سوختی یکی از تکنولوژی های جدید در زمینه تولید انرژی الکتریکی است که از سازگاری خوبی با محیط زیست برخوردار است و در آن تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی با بازدهی بالا صورت می پذیرد. این شیوه تولید جریان الکتریکی از هرگونه احتراق بی نیاز بوده، سر و صدای کمتری نیز ایجاد می نماید. پیل سوختی PEM یکی از انواع پیل های سوختی است که به عنوان مولد انرژی الکتریکی در وسایل حمل و نقل و مصارف نیروگاهی در ظرفیت های پایین استفاده می شود. از دیگر مزایای پیل سوختی PEM پایداری شیمیایی بالا و استحکام

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۲/۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۲/۲۵

نام نویسنده ی مسئول : امین حاجی زاده

نشانی نویسنده ی مسئول : ایران - شاهرود - بلوار دانشگاه

دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده ی مهندسی برق

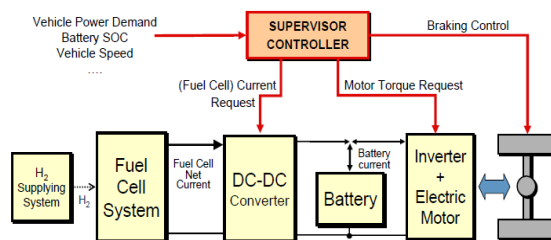
[۶]. در مراجع [۱۰،۹] راهکار کنترل برای خودروی هایبرید پیل سوختی بر پایه مدل سازی دینامیکی خودرو معرفی شده است. این نوع راهکار دارای پیچیدگی زیاد و حجم محاسبات بالایی است. بهینه سازی دینامیکی ارائه شده در این مقالات به گونه ای است که نمی توان از آن در شرایط زمان واقعی استفاده نمود.

از این رو، در این مقاله، راهکار کنترل هوشمند برای خودروی هایبرید سوختی پیشنهاد شده است. ابتدا ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی شرح داده می شود و در ادامه ساختار کنترل هوشمند طراحی می گردد. در انتها، نتایج شبیه سازی و تحلیل آن به منظور صحت گذاری بر راهکار کنترل پیشنهادی ارائه می شوند.

۲- ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی

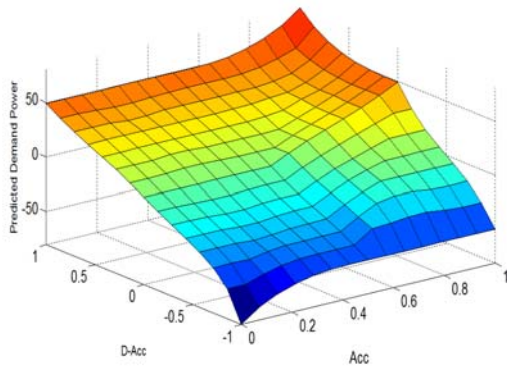
در شکل (۱) ساختار در نظر گرفته شده در این مقاله برای خودروی هایبرید پیل سوختی نشان داده می شود. همان طور که مشاهده می گردد، پیل سوختی و ذخیره سازی انرژی باتری از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به موتور الکتریکی متصل شده اند. موتور الکتریکی در نظر گرفته شده از نوع AC بوده که برای رانش خودرو به کار گرفته می شود. به منظور شبیه سازی خودروی هایبرید پیل سوختی از مدل‌های دینامیکی تک تک اجزا استفاده شده است تا بتوان مشخصه های عملکردی خودرو، نظیر ولتاژ و جریان پیل سوختی و باتری، حالت شارژ باتریها، گشتاور موتور الکتریکی و سرعت خودرو را ارزیابی نمود. مدل‌های ریاضی اجزای بکار رفته در ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی در مراجع [۱۳-۱۱] آورده شده است.

معمولاً شامل سوئیچینگ‌ها و تغییر مدهای عملکردی و سیگنال‌های کنترلی نمونه برداری اطلاعات و سیگنال‌های پیوسته است که خودروهای هایبرید همواره در معرض این فرآیندها به صورت دینامیک‌های زمان پیوسته و زمان گسسته هستند. از این رو، خودروی هایبرید یک سیستم دینامیکی هایبرید است [۲۰،۱]. با توجه به پیچیدگی خودروی هایبرید برقی پیل سوختی، تاکنون روش‌ها و الگوریتم‌های کنترلی متفاوتی برای کنترل آن به کار رفته است. بسیاری از راهکارهای کنترلی عملکردی برپایه مشاهدات و قوانین تجربی است. این روش بر پایه نتایج به دست آمده از اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی است و براساس مدل‌های استاتیکی سیستم استوار است. در این روش، مدهای عملکردی سیستم خودروی هایبرید قابل شناسایی بوده، می توان به آسانی این روش را در عمل پیاده سازی کرد [۳-۵]. بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت انرژی در خودرو هایبرید پیل سوختی بر مبنای مدل سازی استاتیکی سیستم محرکه رانشی خودروی برقی هایبرید است. معمولاً در این روش توان الکتریکی به مقدار معادلی از نرخ سوخت در حالت، دائم به منظور محاسبه تابع کلی مصرف سوخت تبدیل می شود. در این حالت معیار کلی به وسیله معیار محلی جایگزین شده، مسأله بهینه سازی کلی به یک مسأله مصرف سوخت معادل در هر لحظه کاهش می یابد. در حقیقت، تابع بهینه سازی به صورت مجموع مصرف سوخت توسط موتور احتراقی و مصرف سوخت معادل انرژی الکتریکی مربوط به موتور الکتریکی، است. در این روش از فرض های استاتیکی و شبه استاتیکی برای مدل سازی استفاده شده، با استفاده از نقشه‌های بازده پیل سوختی و سایر زیر سیستم‌های نیرومحرکه رانشی خودرو، استراتژی کنترل بنا می شود [۸-۸].



شکل (۱): ساختار خودروی هایبرید برقی پیل سوختی

Acc بین صفر و یک، ΔAcc بین -۱ و +۱ و جهت گیری راننده بین -۱ و +۱ نرمالیزه شده اند [۱۴]. این اعداد براساس مشخصه های فنی خودروی مورد نظر انتخاب شده اند.



شکل (۳): صفحه فازی بین ورودی-خروجی DIP

۳-۲- محاسبه توان مورد نیاز راننده

این بخش از ساختار کنترل کننده توان، میزان جهت گیری راننده را که در بخش قبلی محاسبه می گردد، به توان مورد نیاز جاده تبدیل می کند. برای این منظور، ابتدا باید بیشترین توانی که موتور الکتریکی می تواند تحویل دهد، محاسبه گردد. بیشترین توان موتور الکتریکی براساس سرعت لحظه ای موتور و برپایه نقشه بازده موتور محاسبه می شود [۱۴]. پس از محاسبه بیشترین توان موتور الکتریکی، عدد متناظر با جهت گیری راننده که در قسمت قبلی محاسبه گردید، در این میزان توان ضرب می گردد تا توان مرجع درخواستی از موتور الکتریکی مشخص گردد. توان مرجع در حالت شتاب گیری مثبت و در ترمز گیری منفی است.

۳-۳- کنترل توان پیل سوختی

استراتژی کنترل توان پیل سوختی در خودروی هایبرید پیل سوختی نقش بسیار مهمی را در توزیع توان به عهده دارد. در این استراتژی باید سهم هریک از منابع تولید توان برای تامین توان مورد نیاز به صورت صحیحی مشخص

۳- کنترل توان در خودروی هایبرید پیل سوختی

یکی از مسائل بسیار مهم در خودروهای هایبرید پیل سوختی، پیاده سازی راهکار مدیریت توان در این خودروها است. در واقع، مدیریت توان در این خودروها این امکان را فراهم می سازد تا هر کدام از اجزای تشکیل دهنده خودرو شامل باتری، پیل سوختی و مبدل های الکترونیک قدرت در ناحیه عملکردی بهینه کار کنند. همچنین، با طراحی این استراتژی قابلیت رانشی خودرو باید حفظ گردد تا خودرو بتواند مسیر حرکتی تعیین شده را به درستی طی کند. براین اساس، ساختار کنترلی پیشنهادی در این طرح در شکل (۲) نشان داده می شود. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، ساختار کنترلی طراحی شده از سه بخش اساسی تشکیل شده است. این بخش ها شامل پیش بینی کننده جهت گیری راننده^۱، محاسبه کننده توان راننده^۲ و کنترل کننده توان پیل سوختی^۳ هستند. در ادامه هر یک از این بخش ها توضیح داده می شود.



شکل (۲): طرح پیشنهادی استراتژی کنترل خودروی هایبرید برقی پیل سوختی

۳-۱- پیش بینی جهت گیری راننده

به منظور افزایش قابلیت رانشی خودروی هایبرید پیل سوختی، یک کنترل کننده فازی برای پیش بینی جهت گیری راننده (DIP) استفاده می شود. این کنترل کننده دارای دو ورودی شامل شتاب گیری (Acc) و تغییرات شتاب گیری (ΔAcc) است. خروجی DIP به عنوان میزان گشتاور درخواستی مرجع برای رانش خودرو در نظر گرفته می شود که اثر پذیری از میزان تغییرات شتاب گیری مثبت و منفی دارد. در شکل (۳) صفحه فازی مرتبط با DIP نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده می شود،

عصبی برای توزیع توان بین باتری و پیل سوختی استفاده می‌شود. در طراحی کنترل کننده فازی، توان درخواستی (P_{req})، توان حالت قبل پیل سوختی ($P_{fc}(k-1)$) و حالت شارژ باتری‌ها (SOC) به عنوان معیارهای تصمیم‌گیری و ورودی کنترل کننده فازی در نظر گرفته شده است. یکی از بخش‌های مهم در طراحی کنترل کننده فازی عصبی، طراحی پایگاه قوانین فازی است که براساس آن خروجی کنترل کننده شکل می‌گیرد. در جدول (۱) پایگاه قوانین فازی مربوط به کنترل کننده نشان داده می‌شود [۱۲].

گردد. از طرفی، باید مشخصه‌های عملکردی هر یک از منابع نظیر حالت شارژ باتری‌ها، ضریب بهره برداری سوخت در مورد پیل سوختی و توان پیل سوختی در محدوده مطلوب قرار بگیرد. وجود توان‌های درخواستی با تغییرات متناوب و مشخصه‌های باری که غیر قابل پیش‌بینی هستند، به عنوان نامعینی‌های اجتناب‌ناپذیر هستند. در این صورت، ضروری به نظر می‌رسد تا استراتژی کنترل توانی برای در خودروی هابیرید پیل سوختی طراحی گردد تا بتواند نسبت به تغییرات موجود در سیستم عملکرد مطلوبی داشته باشد. برای این منظور از یک کنترل کننده فازی

جدول (۱): پایگاه قوانین فازی برای کنترل کننده فازی

| Inputs | | | output |
|-----------|------|---------------|-------------|
| P_{req} | SOC | $P_{fc}(k-1)$ | $P_{fc}(k)$ |
| low | low | Low | medium |
| medium | low | medium | high |
| medium | high | Low | medium |
| medium | high | medium | low |
| high | high | medium | high |
| high | high | Low | medium |
| high | high | High | medium |
| high | low | Low | medium |
| high | low | medium | high |
| low | high | ----- | Zero |

می‌گردد. سپس براساس میزان توان درخواستی از طرف بار، توانی که باید توسط ذخیره ساز انرژی (P_{batt_ref}) تولید شود، به وسیله رابطه ذیل تعیین می‌گردد:

$$P_{batt_ref} = P_{req} - P_{fc} \quad (1)$$

براساس آن تغییرات توان پیل سوختی به گونه‌ای تنظیم می‌شود تا بازده پیل سوختی حداکثر گردد. برای یافتن نقطه کار بهینه پیل سوختی از نقشه بازده^۴ پیل سوختی استفاده می‌شود. برای نمونه، برای یک پیل سوختی 50kW نقشه

در طراحی پایگاه قوانین فازی، سعی شده است تا موارد ذیل که نقش مهمی در عملکرد سیستم ایفا می‌کنند، برآورده گردد [۱۲،۵]:

- تغییرات توان پیل سوختی با توجه به محدودیت در تغییرات توان آن باید به آرامی صورت پذیرد.
 - حالت شارژ باتری‌ها باید در محدوده مطلوب قرار بگیرد.
 - توان درخواستی از طرف بار تامین گردد.
- براساس کنترل کننده فازی طراحی شده، میزان توان مطلوبی که باید به وسیله پیل سوختی تامین شود، مشخص

تابع هدف رابطه (۲)، از سه جزء اساسی تشکیل شده است که براساس آن توان خروجی پیل سوختی، حالت شارژ باتری‌ها و ضریب بهره برداری از سوخت در پیل سوختی باید در مقدارهای بهینه قرار بگیرند.

همچنین کران‌هایی برای هریک از متغیرهای تصمیم‌گیری سیستم براساس روابط ذیل تعریف می‌گردد:

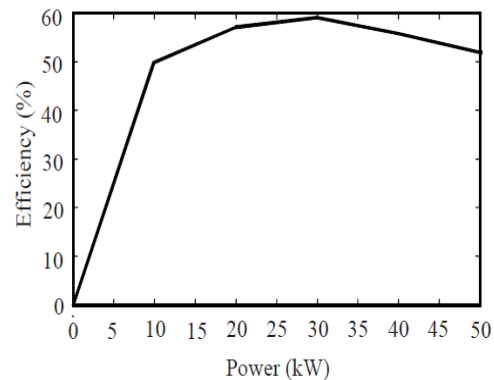
$$\begin{aligned} SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \\ P_{fc,\min} \leq P_{fc} \leq P_{fc,\max} \\ U_{f,\min} \leq U_f \leq U_{f,\max} \end{aligned} \quad (۳)$$

در تابع فوق، N طول دوره زمانی مسیر رانشی تعیین شده است. ضرایب w_i نشان دهنده اهمیت نسبی هریک از اهداف در نظر گرفته شده در تابع هدف کلی است و در رابطه (۴) صدق می‌کند.

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (۴)$$

در مرجع [۱۵]، از روش فازی عصبی برای تعیین بهینه پارامترهای سیستم فازی استفاده شده است. استراتژی کنترل فازی عصبی استفاده شده در این مقاله، از توابع عضویت گوسی استفاده می‌کند. با استفاده از مجموعه های فازی گوسی، الگوریتم مورد نظر قادر به بهره برداری همه اطلاعات موجود در فرآیند آموزش برای محاسبه نتیجه هر قانون است. در شکل (۵) یک ساختار فازی عصبی نمونه با دو متغیر ورودی (x_1, x_2) و یک متغیر خروجی y نشان داده شده است. در نخستین مرحله از این ساختار، دو متغیر ورودی به مقادیر زبانی توسط توابع عضویت گوسی تبدیل می‌شود. در دومین مرحله، درجه فعال شدن هر قانون $R^{(l)}$ محاسبه می‌شود. در نهایت، مرحله استنتاج است که وزن دهی قوانین فازی براساس درجه فعال سازی که در مرحله دوم انجام گرفته، صورت می‌گیرد [۱۶].

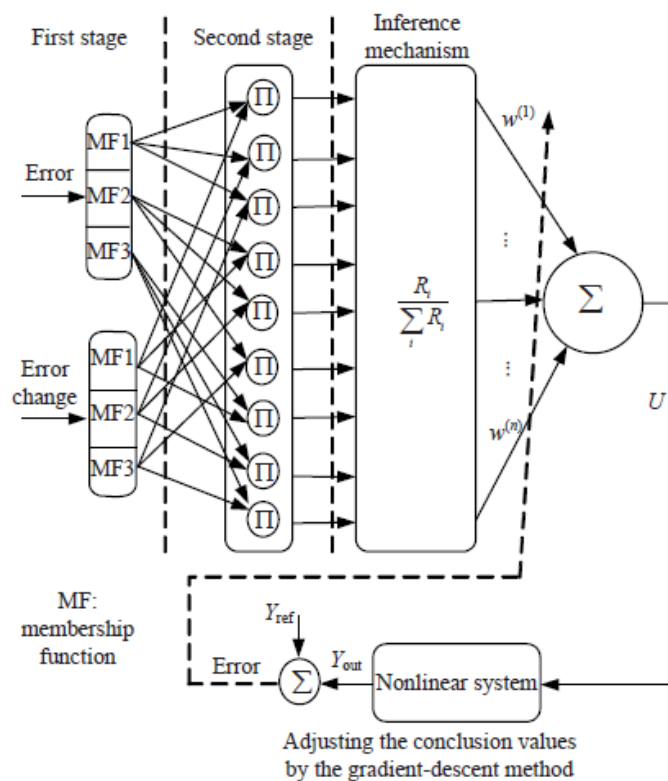
بازده در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۲]. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، برای عملکرد یک پیل سوختی در بازده حداکثر (60%-50%)، تغییرات توان پیل سوختی بهتر است بین 30-35kW تغییر کند. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، تغییرات توان پیل سوختی در همان محدوده ای است که بازده پیل سوختی ماکزیمم گردد. علاوه بر موارد فوق، متغیر مهم دیگری که در عملکرد پیل سوختی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند، ضریب بهره برداری واکنش است که با U_f نشان داده می‌شود. این پارامتر معرف مقدار سوختی است که در واکنش شیمیایی مصرف می‌شود. برای بهره برداری بهینه از پیل سوختی، مقدار ضریب بهره برداری بالاتر مطلوب بوده، حدود ۹۰-۸۰ درصد است [۱۳].



شکل (۴): منحنی تغییرات بازده پیل سوختی بر حسب توان خروجی آن

براساس موارد مطرح شده، به منظور طراحی بهینه استراتژی کنترل، قوانین فازی کنترل کننده مورد نظر باید به صورت بهینه تعیین گردند. برای این منظور از یک ساختار فازی-عصبی به منظور بهینه نمودن تابع هدف (۲) استفاده شده است.

$$\begin{aligned} E(k) = \sum_{k=1}^{N-1} \left(w_1 (P_R(k) - P_{R,opt})^2 + w_2 (SOC(k) - SOC_{opt})^2 \right. \\ \left. + w_3 (U_f(k) - U_{f,opt})^2 \right), \end{aligned} \quad (۲)$$



شکل (۵): ساختار کنترل کننده فازی-عصبی

است. در این رابطه مقدار α ، نرخ آموزش است و نقش مهمی در فرآیند آموزش دارد.

$$\omega^{(l)}(t+1) = \omega^{(l)}(t) - \alpha \frac{\partial E}{\partial \omega^{(l)}} \quad (۷)$$

۴- نتایج شبیه سازی و تحلیل

به منظور صحه گذاری بر استراتژی کنترل پیشنهادی، ساختار شکل (۱) به منظور مدیریت توان در خودروی هایبرید پیل سوختی شامل منابع تولید توان، مبدل‌های الکترونیک قدرت و دینامیک خودروی شبیه سازی شده است. در این ساختار پیل سوختی و باتری به صورت موازی با هم از طریق مبدل‌های DC-DC به باس dc متصل شده اند. موتور الکتریکی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی از نوع القایی است. به منظور تغذیه موتور الکتریکی AC از یک اینورتر استفاده شده است تا ولتاژ DC در سمت باس DC را به ولتاژ AC مورد نیاز برای موتور الکتریکی تبدیل کند. در شبیه سازی انجام شده، ولتاژ باس

خطای بین مقدار مرجع و مقدار اندازه گیری شده به عنوان یک معیار با استفاده از روش گردیان نزولی برای تنظیم بخش استنتاج قوانین به کار می‌رود. این الگوریتم مقادیر وزنی در بخش استنتاج $\omega^{(l)}$ را با مینیمم کردن تابع هدف E (رابطه (۵)) که براساس روش کمترین مربعات خطا استوار است، تنظیم می‌نماید. در رابطه (۵) مقدار $y'(k)$ مقدار مطلوب خروجی است. همچنین، مقدار $Y(x'(k))$ ، خروجی سیستم فازی بوده، بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود و به متغیرهای ورودی وابسته است.

$$E = \frac{1}{2} [Y(x'(k)) - y'(k)]^2 \quad (۵)$$

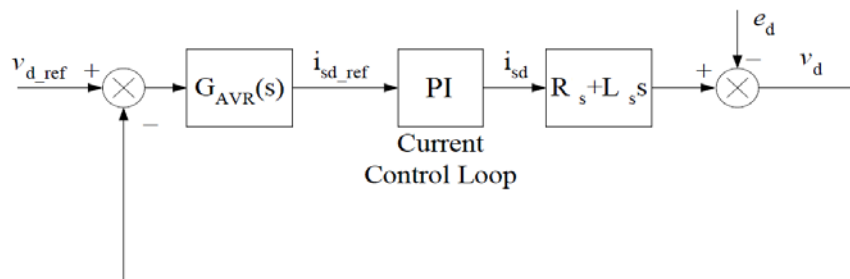
$$Y(x'(k)) = \frac{\sum_{l=1}^c \left(\prod_{j=1}^m \mu_{A_j^{(l)}}(x'_j(k)) \right) \omega^{(l)}(k)}{\sum_{l=1}^c \left(\prod_{j=1}^m \mu_{A_j^{(l)}}(x'_j(k)) \right)} \quad (۶)$$

برای تنظیم وزن‌های خروجی در بخش استنتاج از روش گردیان نزولی استفاده شده و به صورت رابطه (۷)

کنترل کننده PI در نظر گرفته شده به صورت $(kp + ki/s)$ است که براساس روش مکان ریشه و نمودار بود طراحی شده است.

به منظور طراحی کنترل کننده PI، از مدل میانگین اینورتر سه فاز استفاده شده است [۱۲]. کنترل کننده‌ها شاخص مدولاسیون و زاویه فاز اینورتر را به منظور برآورده نمودن اهداف کنترلی را تنظیم می‌نمایند. پارامترهای طراحی شده برای کنترل کننده در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۶) حلقه کنترل اینورتر سه فاز نشان داده شده است.

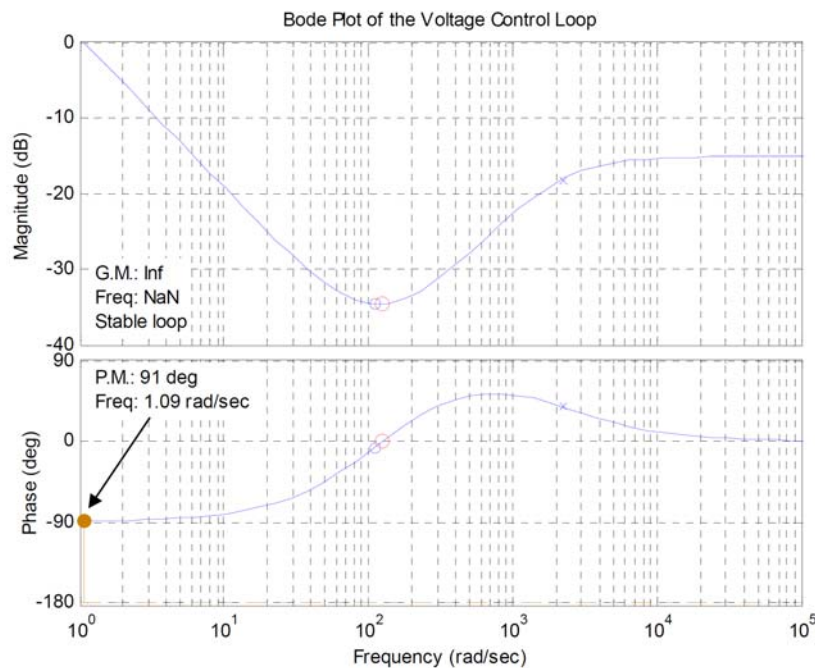
dc برابر ۴۰۰ ولت در نظر گرفته شده است تا سمت AC اینورتر ولتاژ ۲۲۰ ولت متناوب تولید شود. اینورتر به وسیله کنترل کننده‌های PI به منظور تنظیم ولتاژ خروجی و توان اکتیو مورد نیاز موتور کنترل می‌شود. به منظور استخراج نتایج، از نرم افزار Matlab و براساس مدل‌های موجود در جعبه ابزار Power Systems در محیط Simulink استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی اجزای تشکیل دهنده خودروی هایبرید پیل سوختی در جدول (۲) آورده شده است [۱۷].



شکل (۶): حلقه کنترل ولتاژ اینورتر سه فاز

اینورتر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد که برای سیستم پایدار، بهره فاز برابر ۹۱ درجه می‌باشد.

در ساختار شکل (۶)، تابع تبدیل $G_{AVR}(s)$ تنظیم کننده ولتاژ می‌باشد. در شکل (۷) نمودار بود حلقه کنترل ولتاژ



شکل (۷): نمودار بود حلقه کنترل ولتاژ اینورتر

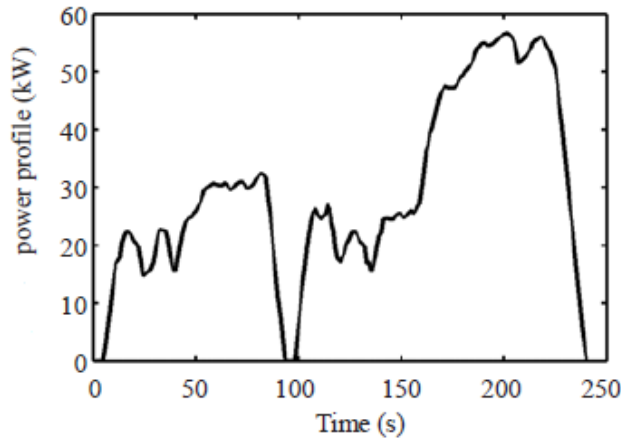
در خودروی هایبرید پیل سوختی، باتری به منظور تامین توان درخواسی در حالت گذرا و حالت‌های پیک توان به کار می‌رود. هنگامی که تغییرات توان درخواسی از طرف موتور الکتریکی دارای تغییرات سریعی باشد، در این حالت پیل سوختی به علت داشتن دینامیک کند نمی‌تواند به تامین توان درخواسی سریعی پاسخ دهد و باتری به عنوان تامین کننده توان در حالت‌های گذرا بکار می‌رود.

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی اجزاء تشکیل دهنده خودروی هایبرید پیل سوختی

| Fuel Cell System Parameters | |
|--|-------------------------------|
| Faraday's constant (F) | 96484600[C/kmol] |
| Hydrogen time constant (t_{H_2}) | 26.1 [s] |
| Hydrogen valve molar constant(K_{H_2}) | 8.43×10^{-4} |
| k_r Constant= $N_0/4F$ | 9.9497×10^{-7} |
| No Load Voltage (E_0) | 0.6 [V] |
| Number of Cells (N_0) | 384 |
| Oxygen time constant (t_{O_2}) | 2.91[s] |
| Oxygen valve molar constant (K_{O_2}) | 2.52×10^{-3} |
| FC internal resistance (r) | 0.126 [Ω] |
| FC absolute temperature (T) | 343 [K] |
| Universal gas constant (R) | 8314.47 [J/(kmol K)] |
| Utilization Factor (U_p) | 0.8 |
| Water time constant (t_{H_2O}) | 78.3 [s] |
| Water valve molar constant (K_{H_2O}) | 2.81×10^{-4} |
| DC/DC Converter Parameters | |
| Rated voltage (V) | 200V/540V |
| Resistance (R) | 2.3 [Ω] |
| Capacitance (C) | 1.5 [mF] |
| Inductor (L) | 415 [μ H] |
| DC/AC Converter Parameters | |
| Nominal AC Voltage | 400 V |
| Nominal phase current | 100 A |
| Nominal DC voltage | 540 V |
| DC-link capacitance | 550 μ F |
| R_s | 23 m Ω |
| L_s | 0.73 mH |
| f_s | 50 Hz |
| Battery Bank Parameters | |
| Capacity (Q_m) | 50 [A.h] |
| No. of module | 25 |
| Rated voltage | 308 [V] |
| Internal resistance (R_a) | $0.015 \pm 25\%$ [Ω] |
| Terminal resistance (R_b) | $0.015 \pm 25\%$ [Ω] |
| Incipient capacitance (C_i) | 3 [F] |
| polarization capacitance (C_p) | 3 [F] |
| Minimum state of charge | 70% |
| Maximum state of charge | 80% |
| Vehicle Parameters | |
| Vehicle mass | 1200Kg |
| Vehicle Front Area | 1.7m ² |
| Air Density | 1.225Kg/m ³ |
| Gravitational Acceleration | 9.81m/s ² |
| PI controller Parameters | |
| K_p | 0.25 |
| K_i | 2.1 |

باتری بتواند برای مدت 100sec توان 20KW تولید نماید. علاوه بر این فرض شده است ضرایب w_i در رابطه (۴) یکسان و مساوی در نظر گرفته شود تا اهمیت توابع هدف در طراحی استراتژی کنترل یکسان باشد.

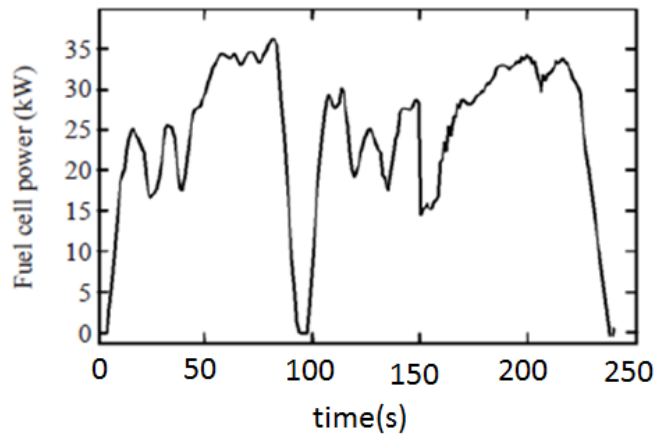
در شکل (۸) پروفایل توان درخواستی به منظور شبیه سازی عملکرد خودروی هایبرید پیل سوختی نشان داده شده است [۱۸]. محاسبات نشان می دهد که توان مصرفی در خواستی کمتر از 45KW است. برای این منظور، فرض شده است، توان خروجی پیل سوختی 45KW باشد و بانک



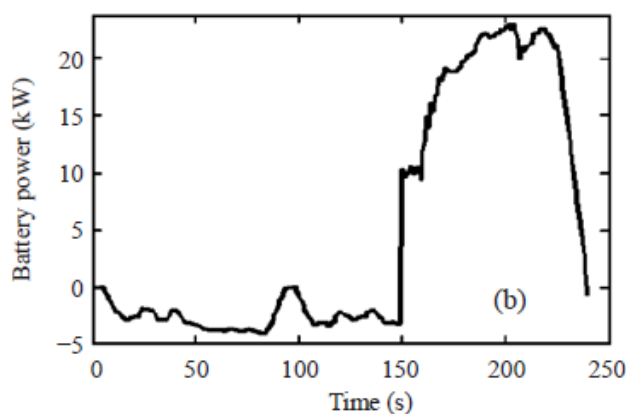
شکل (۸): مشخصه توان درخواستی از طرف سیکل رانشی

همان طور که مشاهده می شود، اگر توان درخواستی از سمت سیکل رانشی کم باشد، بانک باتری توان مورد نیاز را تامین می نماید.

نتایج شبیه سازی در این مقاله برای یک بازه زمانی 0 تا 250 ثانیه در نظر گرفته می شود. در شکل های (۹) و (۱۰) توان خروجی پیل سوختی و باتری نشان داده شده است.

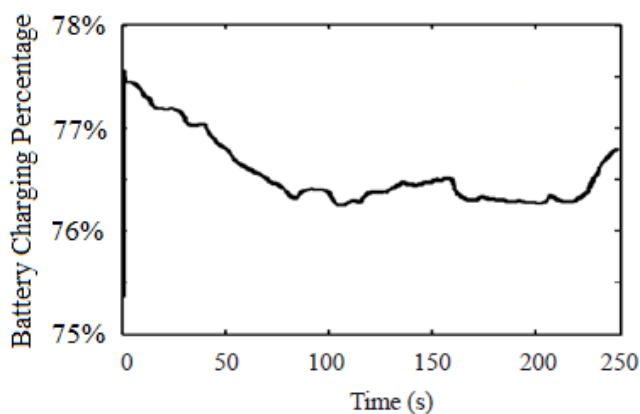


شکل (۹): توان خروجی پیل سوختی



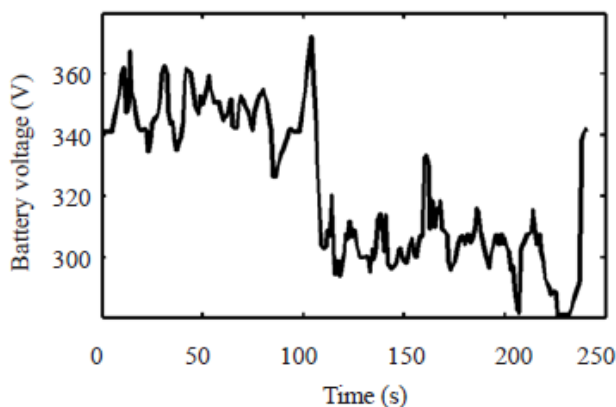
شکل (۱۰): توان خروجی باتری

در صورتی که توان درخواستی بالا باشد، پیل سوختی و باتری با همدیگر در توزیع توان سهیم خواهند بود. در این حالت همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، پیل سوختی در محدوده توان بهینه عمل می نماید. در شکل (۱۱) تغییرات حالت شارژ باتری نمایش داده می شود.

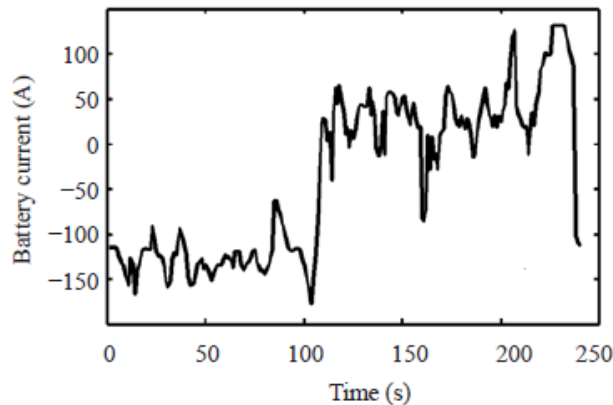


شکل (۱۱): تغییرات حالت شارژ باتری

بر اساس شکل (۱۱)، تغییرات حالت شارژی باتری در محدوده مطلوب قرار گرفته است. هنگامی که باتری بخشی از توان مورد نیاز برای رانش خودرو را تامین می نماید حالت شارژی باتری‌ها کاهش می یابد و هنگامی که باتری‌ها شارژ می شوند، حالت شارژ روند افزایشی دارد. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تغییرات ولتاژ و جریان باتری نسبت به زمان نشان داده می شوند.



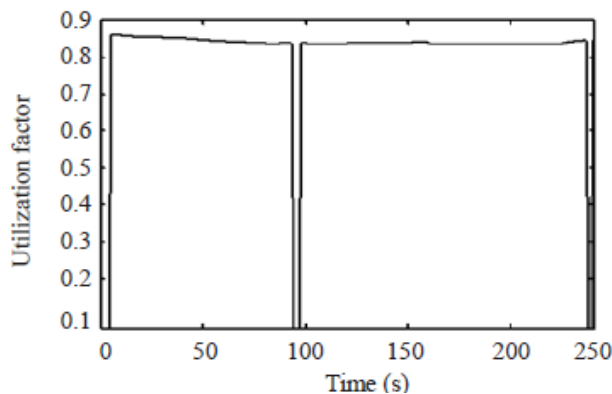
شکل (۱۲): تغییرات ولتاژ باتری



شکل (۱۳): تغییرات جریان باتری

است، جریان بانک باتری منفی می‌شود و براساس شکل (۱۲) ولتاژ باتری افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۱۴) ضریب بهره برداری از سوخت در پیل سوختی نشان داده شده است که در محدوده 0.85 تغییر می‌کند.

در حاتی که توان تولیدی پیل سوختی بیشتر از توان درخواستی از سمت موتور الکتریکی باشد، در این حالت مازاد توان خروجی پیل سوختی برای شارژی باتری‌ها به کار می‌رود و همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده



شکل (۱۴): تغییرات ضریب بهره برداری از سوخت در پیل سوختی

ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی در نظر گرفته شده، پیل سوختی، باتری، موتور الکتریکی و نیرو محرکه خودرو در نظر گرفته شده است. روش مدیریت توان لحظه ای بر پایه کنترل کننده فازی عصبی بین دو منبع تولید توان پیل سوختی و باتری است. استراتژی کنترل پیشنهاد شده بر پایه روش هوشمند تمامی مدهای عملکردی ممکن در خودروی هایبرید پیل سوختی را در نظر گرفته، می‌تواند جهت گیری راننده را تخمین بزند. نتایج شبیه سازی روی یک سیکل رانشی نشان می‌دهد که شاخص‌های عملکردی خودروی هایبرید پیل سوختی، نظیر حالت‌های شارژی باتری و

از تحلیل و بررسی نتایج می‌توان استنباط نمود که استراتژی کنترل پیشنهادی باعث شده است تا عملکرد پیل سوختی در ناحیه بهینه عملکردی قرار گیرد. در تحقق بخشیدن عملی استراتژی کنترل پیشنهادی چندین محدودیت، نظیر سرعت محاسبات و پیاده سازی استراتژی کنترل زمان واقعی براساس سیکل‌های رانشی غیر قابل مشخص است که باید به درستی بررسی شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، استراتژی کنترل هوشمند به منظور پخش توان در خودروی هایبرید پیل سوختی ارائه شده است. در

- Vol. 19 (8), September 2009, Pages 1289-1304.
- [10] Y.Tang, W.Yuan, M.Pan, Z.Wan, "Experimental investigation on the dynamic performance of a hybrid PEM fuel cell/battery system for lightweight electric vehicle application", *Applied Energy*, Vol.88 (1), January 2011, Pages 68-76.
- [11] S.M.T Bathaee, S.R.Emami Maybodi, A.Hajizadeh Gastaj, "Dynamic Modeling and Intelligent Control of Hybrid Electric Vehicel", *The 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, July 10-13, 2005 – Orlando, Florida, USA.
- [12] Masoud Aliakbar Golkar, Amin Hajizadeh, "Power Flow Control of a Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Battery Energy Storage System during Voltage Sags in Distribution Systems", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Dec. 2008.
- [13] M. Uzunoglu, M. S. Alam, "Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, VOL. 21, NO. 3, SEPTEMBER 2006.
- [14] M.A.Golkar, A.Hajizadeh, "Power Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles", *Sustainable Energy and Environment 2006: Technology and Policy Innovations Conference*, November 21-23 2006, Bangkok Thailand.
- [15] L X Wang, "Back-Propagation of Fuzzy Systems as Nonlinear Dynamic System Identifiers", *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1409-1418, 1992, San Diego, CA.
- [16] C.H.Lee, C.C.Teng, "Identification and Control of Dynamic Systems Using Recurrent Fuzzy Neural Networks", *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, Vol. 8, NO. 4, AUGUST 2000.
- [17] J. Van de Vegte, *Feedback Control Systems*, 3rd ed., Englewood Cliffs, J: Prentice Hall, 1994.
- [18] National Renewable Energy Laboratory. ADVISOR Documentation, Golden, CO. [Online]. Available: <http://www.cts.nrel.gov/analysis/>
- ضریب بهره برداری سوخت در پیل سوختی در محدوده مناسب قرار گرفته است.
- سیاسگزاری**
- این تحقیق با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به انجام رسیده است.

مراجع

- [1] S.Campanari, G.Manzolini, F.G.D.E .Iglesia. "Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations", *Journal of Power Sources*, Vol.186 (2), Jan. 2009, Pages 464-477.
- [2] A.Veziroglu, R.Macario, "Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36 (1), January 2011, Pages 25-43.
- [3] I.Cervantes, F.J.Perez-Pinal, J.Leyva-Ramos, A.Mendoza Torres. "Hybrid Control Technique Applied in a FC-SC Electric Vehicle Platform", in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '10*. pp. 696-703, 1-3 Sept. 2010.
- [4] S. Caux, W. Hankache, M. Fadel, D. Hissel. "On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.35 (5), March 2010, Pages 2134-2143.
- [5] Y. Eren, O. Erdinc, H. Gorgun, M. Uzunoglu, B. Vural. "A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34 (20), October 2009, Pages 8681-8694.
- [6] H.Zhao, A.F. Burke. "Optimization of fuel cell system operating conditions for fuel cell vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol.186 (2), 15 January 2009, Pages 408-416.
- [7] Min-Joong Kim, Huei Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol.165 (2), 20 March 2007, Pages 819-832.
- [8] C.H. Zheng, N.W. Kim, S.W. Cha. "Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.37 (1), January 2012, Pages 655-663.
- [9] A.Arce, A.J. del Real, C.Bordons. "MPC for battery/fuel cell hybrid vehicles including fuel cell dynamics and battery performance improvement", *Journal of Process Control*,

زیر نویس ها

¹ Driver's Intention Predictor (DIP)

² Driver's Power Computation (DPC)

³ Fuel Cell Power Controller (FCPC)

⁴ Efficiency map