

مدل سازی و شبیه سازی سیستم تولید توان خودروی پیل سوختی

سید مهدی حسینی بیرون^۱، امیر حسین شامخی^۲، آریا یزدانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد نیرو محرکه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

radin.hosseini@gmail.com

^۲ استادیار گروه نیرو محرکه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ir, shamekhi@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد نیرو محرکه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

arya_y24@yahoo.com

چکیده

در چند سال اخیر شرکت های عمده ی خودروساز جهان سرمایه گذاری عظیمی در زمینه ی خودروهایی که با قوای محرکه پیل سوختی پلیمری رانده می شوند انجام داده اند. علت محبوبیت زیاد پیل های سوختی الکترولیت پلیمری بازده بسیار زیاد، چگالی توان بالا و عدم آلودگی هوا توسط این مبدل انرژی است. یکی از نیازمندی های خودروی پیل سوختی، پیش گویی رفتار گذرای سیستم است. هدف این مقاله تحقیق به روی پیل های سوختی با غشای الکترولیت پلیمری (PEMFC) با هدف شبیه سازی سیستم تولید توان پیل سوختی است. در این مقاله باتمركز به روی چهار بخش شامل سیستم تامین هوا، سیستم تامین هیدروژن، سیستم خنک کاری و پیل سوختی، یک مدل ریاضی با قابلیت تطابق پذیری بالا برای یک خودروی پیل سوختی ارائه می شود. در انتها مقادیر بهینه ی نسبت اکسیژن در دسترس کاتد، دبی هوای ورودی به کاتد و توان مورد استفاده ی کمپرسور توسط این مدل پیش بینی می شود.

کلمات کلیدی

پیل سوختی، سیستم تولید توان، مدل دینامیکی، کاتد و آند، فشار جزئی

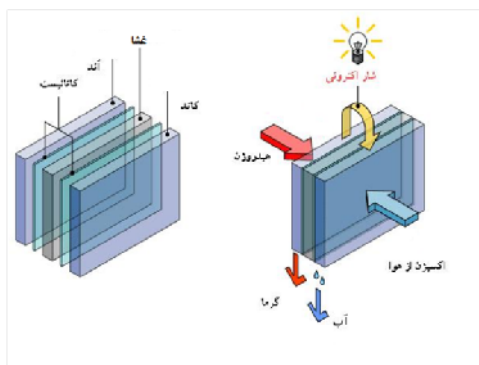
مقدمه

از هیدروژن به عنوان پاک ترین و پر انرژی ترین سوخت یاد می شود. پیل سوختی دارای مزایایی از قبیل عدم آلودگی هوا، چگالی توان و بازده بالا، طول عمر زیاد، آلودگی صوتی کم و عدم وجود قطعات و قسمت های متحرک است بدین دلایل و نیز وجود فشار عمومی و قوانین محدود کننده برای افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت و آلودگی تحقیقات وسیعی بروی این تکنولوژی در صنعت خودرو سازی انجام شده است.

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت (هیدروژن یا متانول) و هوا را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. هر سلول پیل سوختی، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، از سه جز آند، کاتد و الکترولیت تشکیل شده است. پیل های سوختی آلودگی هوا و صوتی ایجاد نمی کنند و در آن ها اتلاف انرژی حداقل است. این مولدهای انرژی دارای بازده بالایی هستند [۱].

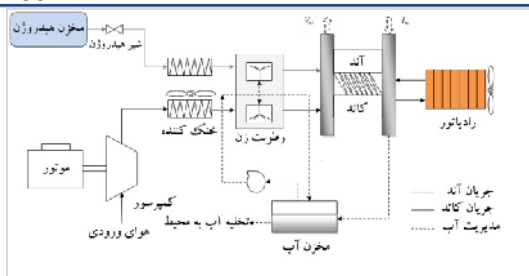
پیل های سوختی پلیمری تنها نوع پیل سوختی است که برای مصرف در صنعت حمل و نقل مناسب است. الکترولیت در این پیل های سوختی یک پلیمر هدایت کننده ی یون با سطح پوشیده از کاتالیست است که هادی بسیار خوب

پروتون می باشد. تنها مایع موجود در این نوع سلول های سوختی آب است، بنابراین مسائل مربوط به خوردگی شیمیایی بسیار محدود است. معمولاً از الکترودهای کربنی با الکتروکاتالیست های پلاتینی در آند و کاتد استفاده می شود و در کنار آن ها، اتصالات داخلی کربنی یا فلزی به کار گرفته می شود. این پیل ها به علت داشتن چگالی توان بالا، الکترولیت جامد، عمر سلولی زیاد، رسوب کمتر و دمای عملکرد پایین برای استفاده در وسایل نقلیه بهتر هستند و همچنین دمای عملکرد پایین آن ها امکان رسیدن به شرایط پایدار و داشتن زمان استارت کمتر را به ما می دهد [۲]. یک تک سلول پیل سوختی پلیمری بسته به شرایط کارکرد آن در حدود ۰/۹ - ۰/۷ ولت برق تولید می کند. برای جلوگیری از تلفات الکتریکی، پیل های سوختی در شرایط عملکرد با جریان کم طراحی می شوند تا اتلاف اهمی کمتری داشته باشند. مدیریت آب تولید شده در کاتد، نحوه خنک کاری پیل سوختی، نحوه اتصال سلول های پیل سوختی به هم، فشار عملکرد پیل سوختی و دبی مواد واکنش دهنده عوامل تعیین کننده در توان و بازده پیل سوختی هستند. تا زمانی که پیل سوختی از نظر هیدروژن و اکسیژن تامین شود الکتریسیته تولید خواهد کرد با توجه به اینکه پیل های سوختی به صورت شیمیایی برق تولید می کنند محدودیت قوانین ترمو دینامیک که در واحدهای تولید قدرت مرسوم است را ندارند، بنابراین پیل های سوختی دارای بازده بیشتری در تولید انرژی الکتریکی هستند اصول کار پیل سوختی آسان اما در عمل ساخت آن با بازدهی بالا پیچیده است [۳].



شکل ۱: طرحواره ای از اجزای تشکیل دهنده ی یک پیل سوختی

خودرویی با نیروی محرکه پیل سوختی چگالی توان بالایی دارد. منظور از چگالی توان، توان تولیدی توسط منبع تولید توان به جرم آن است. برای مثال یک سیستم پیل سوختی با سوخت متانول در حدود ۱۹۰۰ وات بر کیلوگرم چگالی توان دارد که این در مورد یک باتری اسیدی ۴۰ وات بر کیلوگرم



شکل ۳: طرحواره‌ای از سیستم تولید توان پیل سوختی

نرخ جریان واکنش دهنده‌ها، فشار کل، فشار جزئی واکنش دهنده‌ها، دما و رطوبت غشا اصلی‌ترین پارامترهایی هستند که باید تنظیم شوند تا به اهداف زیر برسیم:

- پاسخ سریع سیستم به محرک‌های زودگذر، گرم شدن موفق و خاموشی مطمئن سیستم
- توانایی سیستم در اصلاح کردن ولتاژ تولیدی هنگام تغییر توان

اجزای اصلی کنترل، ولتاژ کمپرسور برای تنظیم فشار و دبی هوای ورودی، شیر کنترل فشار جزئی هیدروژن ورودی به پیل سوختی، پمپ آب یا سرعت فن رادیاتور برای تنظیم دما و رطوبت‌ساز برای کنترل رطوبت هستند. پارامترها مستقل نیستند و روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند، شکل (۳). سیستم کلی به پنج زیر شاخه اصلی تقسیم می‌شود که تمامی آن‌ها به تنهایی و نیز در ارتباط با یکدیگر کنترل می‌شوند [۸]. این پنج زیر شاخه عبارتند از:

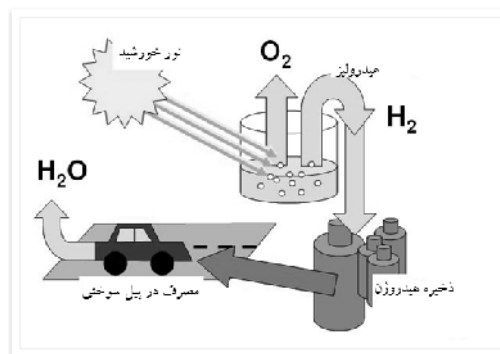
- جریان واکنش دهنده‌ها
- دما و حرارت
- مدیریت آب
- مدیریت توان
- سوخت‌رسانی

این قسمت به توضیح مدل ارائه شده از سیستم پیل سوختی می‌پردازد. این مدل غیر خطی با استفاده از اصول ترمودینامیکی، مکانیک سیالاتی، الکتریکی و الکترو شیمیایی تعریف شده است. هدف اصلی در این مدل‌سازی پیش بینی رفتار دینامیکی سیستم در اثر تغییر فشار جزئی واکنش دهنده‌ها، رطوبت نسبی و دبی آنها است.

مقدار ولتاژ تولیدی در پیل سوختی تحت تاثیر دبی جریان، فشار، رطوبت نسبی و دمای هوا و سوخت، انتقال حرارت و مدیریت آب پیل سوختی است. هنگامی که شرایط بار درخواستی موتور الکتریکی از پیل سوختی تغییر می‌کند، سیستم کنترلی باید فشار جزئی واکنش دهنده‌ها و همچنین دبی سوخت و هوای در شرایطی حفظ کند تا پیل سوختی در شرایط بازده بهینه کار کند [۶]. برای اینکه مطمئن شویم پیل سوختی همواره در شرایطی با بازده بالا کار

است. در مورد زمان شارژ نیز به شکل واضحی این خودرو ارجحیت زیادی به خودروی برقی دارد [۴].

در حال حاضر بزرگترین چالش‌های رودروای این خودروها قیمت بالای آن‌ها و نیز مشکل تامین سوخت برای آن‌ها است. با افزایش سطح تکنولوژی ساخت غشا و الکترودهای پیل سوختی قیمت تمام شده‌ی آن رو به کاهش است و هم چنین فعالیت‌های زیادی در زمینه‌ی تولید هیدروژن خالص بوسیله‌ی الکترولیز آب با استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی مانند باد، خورشید و موج‌ها انجام شده است، شکل (۲). در حال حاضر در بسیاری از شهرهای بزرگ جهان جایگاه‌های سوخت گیری هیدروژن موجود است. برنامه‌ی کمپانی‌های بزرگ خودرو سازی جهان ارائه انبوه مدل‌های تجاری این خودرو در سال ۲۰۲۰ است [۵].

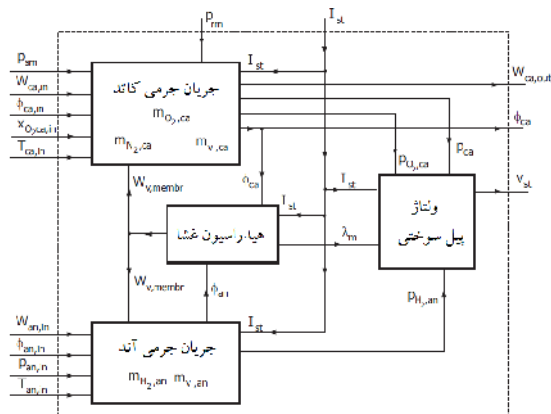


شکل ۲: طرحواره‌ای تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر

مدل‌سازی سیستم تولید توان

برای ساختن یک سیستم تولید توان پیل سوختی علاوه بر پیل سوختی نیاز به اجزای دیگری داریم که عبارتند از: سیستم تامین هیدروژن به آند، سیستم تامین هوا به کاتد، آب غیر یونیزه شده برای خنک کاری پیل سوختی از طریق مجاری خنک کاری، سیستم تامین آب غیر یونیزه برای رطوبت‌زن برای مرطوب سازی هیدروژن و هوای ورودی. عملکرد در فشار بالا باعث افزایش نرخ واکنش و بازده سیستم می‌شود. برای همین منظور به یک کمپرسور و موتور الکتریکی برای رسیدن به فشار و دبی هوای مورد نظر نیازمندیم. هوای خروجی از کمپرسور دارای دمای بالایی است برای همین به یک خنک‌کننده احتیاج داریم. هوای خروجی از پیل سوختی دارای رطوبتی است که در اثر واکنش ایجاد شده است، در یک خودرو به یک جداکننده‌ی آب نیازمندیم تا آب موجود را برای رطوبت زنی هوای ورودی جدا کرده و در اختیار سیستم قرار دهد. یک شیر برای کنترل مقدار هیدروژن ورودی از مخزن تعبیه می‌شود.

ثابت باشد و در طول پیل سوختی تغییر نمی کند. از آنجایی که دینامیک دمای پیل سوختی دارای ثابت زمانی نسبتاً بزرگی در مقایسه با سایر دینامیک‌های این مدل است، ما فرض می کنیم که دما در ۸۰ درجه سانتی گراد ثابت باشد.



شکل ۴: نمودار جعبه‌ای پیل سوختی

مدل ولتاژ شامل معادلاتی برای محاسبه ولتاژ براساس فشار پیل سوختی، دمای آن، فشار جزئی واکنش دهنده‌ها و رطوبت غشا است. فشار و رطوبت متغیر جریان گازهای واکنش دهنده‌ها داخل کانال‌های جریان، در مدل جریان کاتد و آنود محاسبه شده‌اند. پروسه عبور آب از میان غشا نیز توسط مدل هیدراسیون غشا توضیح داده شده است.

ولتاژ براساس تابعی از جریان پیل سوختی، فشار کاتد، فشار جزئی واکنش دهنده‌ها، دمای پیل سوختی و رطوبت محاسبه می شود. سه نوع تلفات اصلی در پیل سوختی در نظر گرفته می شود. برای این کار ترکیبی از روابط فیزیکی و الکتریکی به کار می رود. ولتاژ مدار باز پیل سوختی از موازنه انرژی میان انرژی شیمیایی واکنش‌ها و انرژی الکتریکی محاسبه می شود.

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-2} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \times [Ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} Ln(P_{O_2})] \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۵)، ولتاژ پیل سوختی، T_{fc} دمای پیل سوختی برحسب کلون و P فشار برحسب اتمسفر است. وقتی که پیل سوختی در شرایط واقعی کار می کند ولتاژ حقیقی پیل سوختی کمتر از چیزی می شود که از رابطه‌ی (۵) به دست آمده است. تفاوت‌ها ناشی از برگشت ناپذیری‌ها و تلفات است. با ترکیب تمامی افت ولتاژها، ولتاژ عملکرد پیل سوختی را می توان به شکل رابطه‌ی (۶) نوشت.

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (6)$$

که در رابطه‌ی (۶)، V_{fc} ولتاژ تولیدی یک سلول پیل سوختی، V_{act} تلفات انرژی فعال سازی، V_{ohm} تلفات اهمی و V_{conc} تلفات غلظتی هستند.

می کند احتیاج به فهم، پیشگویی و کنترل سیستم پیل سوختی در محدوده عملکرد و شرایط محیطی مختلف داریم. برای این کار به مدلی از سیستم پیل سوختی نیاز داریم تا با در نظر گرفتن ورودیهای سیستم همواره از تمامی شرایط حاکم بر سیستم و خروجی های مورد نظر آگاه باشیم.

در این مدل فرض شده است که سیستم انتقال قدرت وظیفه خود را بخوبی انجام میدهد تا دمای پیل سوختی همواره در محدوده ۸۰°C باقی بماند. از دینامیک کند سیستم انتقال حرارت و تغییرات دمایی صرف نظر می شود. همچنین فرض می شود واکنش دهنده‌ها به خوبی رطوبت زنی شده و با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ وارد پیل سوختی می شوند. همه‌ی فضای آنود و کاتد پیل سوختی بصورت یک فضای آنود و کاتد در نظر گرفته می شود. در مورد سیستم تغذیه هیدروژن فضای منیفولد ورودی آنفدر کوچک است که آن را جزئی از فضای آنود حساب می کنیم.

ورودی های مدل سیستم تامین هوای کاتد دمای و فشار هوای محیط و ولتاژ ورودی کمپرسور است. معادلات دینامیکی سیستم تامین هوای کاتد که برای مدل سازی به کار می رود در زیر آمده است. متغیر های حالت دور کمپرسور بر حسب رادیان بر ثانیه و جرم و فشار و دمای هوای لحظه ای در منیفولد تغذیه است.

$$I_{cp} \frac{dm_{cp}}{dt} = (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (1)$$

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm,out} \quad (2)$$

$$W_{sm,out} = K_{sm,out} (P_{sm} - P_{ca}) \quad (3)$$

$$\frac{dP_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R_a}{V_{sm}} (W_{cp} T_{cp,out} - W_{sm,out} T_{sm}) \quad (4)$$

که در روابط فوق $K_{sm,out}$ ثابت خروجی منیفلد تغذیه، P_{ca} فشار کاتد، T_{sm} دمای منیفلد تغذیه، m_{sm} جرم هوای موجود در منیفلد تغذیه در هر لحظه، R_a ثابت جهانی گازها، V حجم منیفلد، I_{cp} اینرسی کلی کمپرسور و موتور برحسب $(Kg.m^2)$ و ω_{cp} سرعت کمپرسور برحسب (rad/sec) ، τ_{cp} گشتاور لازم برای کار کردن کمپرسور و τ_{cm} گشتاور تولیدی موتور است.

مدل پیل سوختی

مدل سازی پیل سوختی شامل چهار بخش است که روی همدیگر تاثیر دارند و عبارتند از: مدل ولتاژ پیل سوختی، مدل جریان آنود، مدل جریان کاتد و مدل هیدراسیون غشا. نمودار جعبه‌ای مدل پیل سوختی در شکل (۴) نشان داده شده است. می توان یک مدل حرارت پیل سوختی را هنگامی که تغییرات دمایی نیز به حساب می آیند اضافه کرد. فرض می شود واکنش‌های رخ داده در غشا به شکل کاملاً آبی رخ می دهد. در این مدل فرض می شود دمای پیل سوختی

آند هستند و کل فضای جریان آند و فضای داخل پیل سوختی در یک حجم خلاصه می‌شوند.

مانند مدل جریان کاتد، فشار جزئی هیدروژن و رطوبت جریان آند با موازنه‌ی جرمی جریان هیدروژن و آب در آند به دست می‌آید، شکل (۴) (۱۰). جریان جرمی در آند را نشان می‌دهد. نمودار جعبه‌ای مدل در شکل (۴) (۹) نشان داده شده است. متغیرهای حالت جرم هیدروژن و آب داخل حجم آند هستند.

$$\frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,an,in} - W_{H_2,an,out} - W_{H_2,reacted} \quad (10)$$

$$\frac{dm_{H_2O,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,an,out} - W_{L,an,out} - W_{v,member} \quad (11)$$

که در آن $W_{H_2,an,in}$ مقدار دبی جرمی هیدروژن ورودی به آند، $W_{H_2,an,out}$ مقدار دبی جرمی هیدروژن خروجی از آند، $W_{H_2,reacted}$ دبی هیدروژن واکنش‌دهنده، $W_{v,an,in}$ مقدار بخار ورودی به آند، $W_{v,an,out}$ مقدار دبی بخار خروجی از آند، $W_{v,member}$ مقدار دبی آب منتقل شده از طریق غشا و $W_{L,an,out}$ مقدار آب مایع خروجی از آند است. تمامی واحد دبی‌ها براساس (kg/s) است.

مدل هیدراسیون غشا محتوای آب غشا و دبی جریان آب در طول غشا را حدس می‌زند. فرض می‌شود هم محتوای آب و هم دبی جرمی در سطح غشا یکنواخت باشد. محتوای آب غشا و دبی جرمی غشا هر دو تابعی از جریان پیل سوختی و رطوبت نسبی جریان داخل آند و کاتد هستند. انتقال آب در طول غشا توسط دو پدیده‌ی مجزا به دست می‌آید. مولکول‌های آب داخل غشا توسط H^+ به حرکت درمی‌آیند. این پدیده‌ی پسی الکترواسموتیک نام دارد. دبی آب انتقال یافته توسط این پسا، $N_{v,osmotic}$ ، توسط ضریب الکترواسموتیک، n_d ، به دست می‌آید. این ضریب به عنوان تعداد مولکول‌های آب که توسط هر H^+ انتقال می‌یابد معین می‌شود.

$$N_{v,osmotic} = n_d \frac{i}{F} \quad (12)$$

در این سیستم (۳بعدی) یک گرادیان غلظت آب در عرض غشای آب وجود دارد که به علت تفاوت در محتوای رطوبت جریان‌های آند و کاتد در دو طرف غشا است. این گرادیان غلظت آب باعث نفوذ معکوس آب از کاتد به آند می‌شود. دبی جرمی جریان معکوس آب از کاتد به آند، $N_{v,diff}$ ، بستگی به ضریب نفوذ آب در غشای پلیمری D_w ، دارد.

$$N_{v,diff} = D_w \frac{dw}{dy} \quad (13)$$

تغییرات محتوای رطوبت دو طرف غشا به عرض غشا است. با جمع کردن ۲ عامل بالا و در نظر گرفتن این که گرادیان غلظت آب داخل غشا در طول ضخامت آن خطی باشد، دبی مولی جریان آب داخل غشا را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۱۴) نوشت (جهت مثبت از آند به کاتد است).

مدل‌سازی جریان جرمی کاتد رفتار جریان هوا را داخل کاتد پیل سوختی پیش‌بینی می‌کند. این مدل با استفاده از قوانین ترمودینامیکی بقای جرم و خواص گاز کامل بیان می‌شود. قانون بقای جرم برای توازن جرمی سه جز اکسیژن، نیتروژن و بخار آب داخل حجم کاتد به کار می‌رود. ورودی‌های مدل کاتد شامل جریان پیل سوختی، دمای پیل سوختی، مقدار دبی جرمی آب از طریق غشا، فشار منبسط بازگشت و خواص ترمودینامیکی هوای ورودی شامل دمای جریان، فشار جریان، دبی ورودی، رطوبت نسبی هوای ورودی و مقدار کسر مولی اکسیژن هوا است. مقدار دمای پیل سوختی با استفاده از مدل‌سازی حرارتی پیل سوختی محاسبه می‌شود فرضیات زیادی در مورد کاتد در نظر گرفته می‌شود. اول اینکه تمامی گازها رفتار ایده‌آل دارند. دوم این که دمای جریان داخل کاتد هم درجه با دمای خود پیل سوختی فرض می‌شود. سوم این که متغیرهای جریان خروجی از قبیل دمای هوای خروجی، فشار خروجی، رطوبت نسبی خروجی و نسبت مولی اکسیژن مساوی با مقادیر جریان داخل کاتد فرض می‌شود.

قوانین بقای جرم برای سه جزء نیتروژن، اکسیژن، بخار آب در روابط ۷ تا ۹ آمده است:

$$\frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,reacted} \quad (7)$$

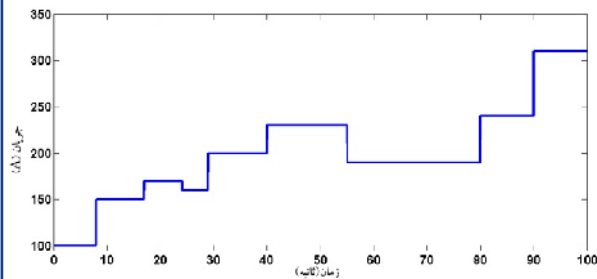
$$\frac{dm_{N_2,ca}}{dt} = W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out} \quad (8)$$

$$\frac{dm_{H_2O,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,ca,gen} + W_{v,member} - W_{L,ca,out} \quad (9)$$

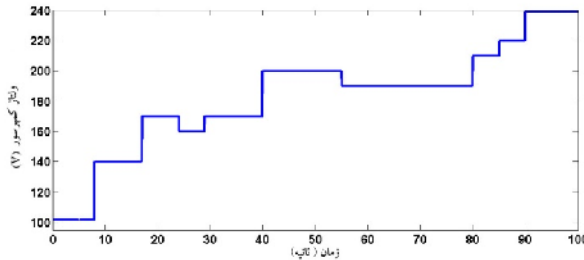
که در آن $W_{O_2,ca,in}$ مقدار دبی جرمی اکسیژن ورودی به کاتد، $W_{O_2,ca,out}$ مقدار دبی جرمی اکسیژن خروجی از کاتد، $W_{O_2,reacted}$ دبی اکسیژن واکنش‌دهنده، $W_{N_2,ca,in}$ دبی نیتروژن ورودی به کاتد و $W_{N_2,ca,out}$ دبی نیتروژن خروجی از کاتد، $W_{v,ca,in}$ مقدار بخار ورودی به کاتد، $W_{v,ca,out}$ مقدار دبی بخار خروجی از کاتد، $W_{v,ca,gen}$ مقدار بخار تولیدی در طی فرایند پیل سوختی، $W_{v,member}$ مقدار دبی آب منتقل شده از طریق غشا و $W_{L,ca,out}$ مقدار آب مایع خروجی از کاتد است. تمامی واحدهای دبی‌ها براساس (kg/s) است. مقدار اکسیژن واکنش‌دهنده و نیز بخار آب تولید شده توسط قوانین الکتروشیمیایی محاسبه می‌شوند. در این مدل سازی فرض می‌کنیم مقدار آب مایع خروجی از پیل سوختی صفر است.

برای سیستمی که ما در نظر گرفتیم هیدروژن در تانک مخصوص، تحت فشار ذخیره شده است. ذخیره‌سازی با فشار بالا به ما این اجازه را می‌دهد تا جریان ورودی آند را در هر لحظه با یک شیر تنظیم کرده و به کمترین اختلاف فشار بین آند و کاتد برسیم. به عبارت دیگر، ما فرض می‌کنیم که مقاومت کانال جریان هوای آند در مقایسه با مقاومت کانال جریان هوای کاتد کمتر است. فرضیات مشابه همانند آن‌چه در کاتد انجام شد در این‌جا نیز صادق است. دمای جریان برابر دمای عملکرد پیل سوختی است. شرایط جریان خروجی نظیر دما، فشار و رطوبت جریان در خروجی آند مانند شرایط جریان

HFCC-

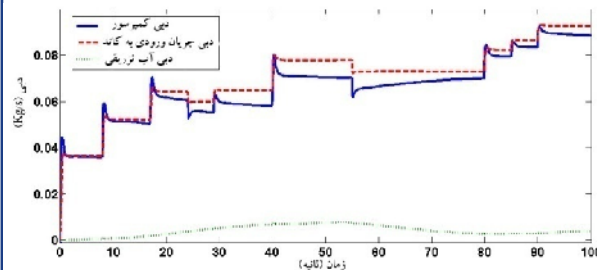


شکل ۵: جریان کشیده شده از پیل سوختی



شکل ۶: ولتاژ متصل به کمپرسور

برای شبیه‌سازی فرض می‌کنیم مقدار آب تزریق شده به جریان ورودی کاتد، $W_{v,in}$ ، دقیقاً همان مقداری باشد که لازم است تا به مقدار رطوبت نسبی مورد نظر (۱۰۰٪) برسیم. این مقدار با دانستن شرایط جریان ورودی به رطوبت‌ساز قابل محاسبه است. شرایط جریان ورودی به رطوبت‌ساز دبی، دما، فشار و رطوبت نسبی جریان خروجی از کولر است.



شکل ۷: منحنی دبی تولیدی کمپرسور، دبی آب تزریقی و دبی ورودی به کاتد

همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود روند تزریق آب به جریان ورودی کاتد بستگی به دبی تولیدی توسط کمپرسور دارد. این دبی با افزایش دبی تولیدی توسط کمپرسور افزایش می‌یابد. اثرات گذرای تغییر ولتاژ متصل به کمپرسور در ثانیه‌های ۸ و ۲۴ و... مشهود است.

$$N_{v,membr} = n_d \frac{i}{F} D_{1W} \frac{(C_{7,ca} - C_{v,an})}{r_{m}} \quad (۱۴)$$

در معادله‌ی فوق r_{m} ضخامت غشای پیل سوختی برحسب سانتی‌متر است. برای یک غشای معین ضریب الکترواسموتیک و ضریب نفوذ با محتوای آب غشا تغییر می‌کند.

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

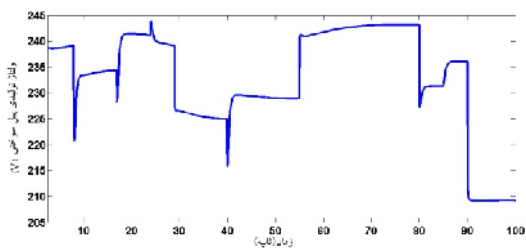
مدل ارائه شده به‌روزی سیستم‌های تامین واکنش‌دهنده‌ها تمرکز کرده است. تمرکز اصلی این مدل به‌روزی کنترل جریان هوای ورودی، تغذیه هیدروژن از مخزن پر فشار و ذخیره‌سازی آن به آند و رطوبت‌زنی جریان واکنش‌دهنده‌ها است. در یک سیستم تولید توان به‌وسیله تزریق مستقیم هیدروژن، پیل سوختی اصلی‌ترین منبع تولید حرارت در سیستم است. به علت دمای عملکرد پایین سیستم، دینامیک دمای سیستم پیل سوختی کند است و می‌توان آن را به عنوان یک سیستم معجزا مدل و شبیه‌سازی کرد. ورودی‌های سیستم برای تعیین و کنترل خروجی‌های سیستم شامل ولتاژ متصل به کمپرسور، فشار هیدروژن، ولتاژ سیستم خنک‌کاری و مقدار آب تزریق شده به جریان در رطوبت‌زن است.

در این بخش مدل دینامیکی ارائه شده را در محیط نرم افزار سیمولینک^۵ شبیه‌سازی کرده و به بحث به‌روزی نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌پردازیم. پارامترهای مورد استفاده در این سیستم همان پارامترهای مورد استفاده در خودرویی فورد پی ۲۰۰۰ است که در آن قوای محرکه آن یک پیل سوختی بالارد ۷۵ کیلو وات است [۱۰] و [۱۱].

ورودی‌های مدل شبیه‌سازی شده دما و فشار محیط عملکرد، ولتاژ متصل به کمپرسور تامین هوای ورودی، جریان کشیده شده از پیل سوختی، فشار هیدروژن خروجی از تانک و ورودی به آند، ولتاژ پمپ سیستم خنک‌کاری و در نهایت مقدار آب تزریق شده به جریان در رطوبت‌ساز است. جریان کشیده شده از پیل سوختی توسط موتورالکتریکی به عنوان ورودی شناخته می‌شود که تغییرات در آن وابسته به مسیر رانندگی و نحوه رانندگی دارد. فشار و دمای هوای ورودی به کمپرسور بستگی به شرایط محیطی رانندگی دارد. پس برای کنترل سیستم و تامین توان مورد نیاز باید ولتاژ متصل به کمپرسور، مقدار آب تزریق شده و فشار کاتد به خوبی کنترل شوند.

برای شبیه‌سازی دینامیکی به یک سری ورودی معلوم برای مطالعه و مقایسه احتیاج داریم. یک سری تغییرات پله‌ای در جریان کشیده شده از پیل سوختی به عنوان ورودی اعمالی به سیستم نشان داده شده است، شکل (۵). هم چنین یک سری تغییرات پله‌ای نیز برای ولتاژ متصل به کمپرسور در شکل (۶) نظر گرفته شده است. با اعمال این ورودی‌ها به سیستم می‌توان یک سری تغییرات در توان درخواستی از موتورالکتریکی و نیز مقدار اکسیژن در دسترس کاتد را برای سیستم شبیه‌سازی کرد.

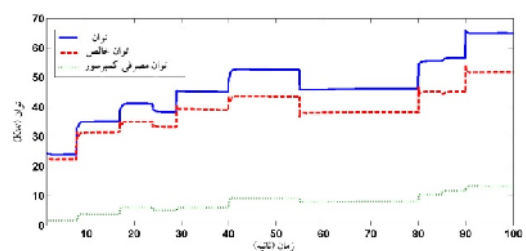
پیل سوختی دارد. این اثر به علت افت غلظت مواد واکنش دهنده در کاتد و آنند، تحت تاثیر تغییر آبی جریان کشیده شده از سیستم ایجاد می شود.



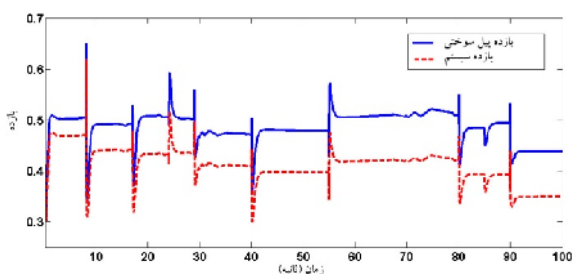
شکل ۹: منحنی ولتاژ تولیدی پیل سوختی

هنگامی که جریان کشیده شده از سیستم افزایش می یابد، هیدروژن و اکسیژن موجود در کاتد و آنند مصرف می شود و سیستم تهی از مواد واکنش دهنده می شود. افزایش ولتاژ متصل به کمپرسور باعث افزایش دبی هوای ورودی به کاتد می شود و فشار کاتد نیز افزایش می یابد. در نتیجه دوباره غلظت مواد واکنش دهنده در کاتد تنظیم می شود. کنترلر فشار جزئی هیدروژن نیز به علت افزایش فشار منیفلد تغذیه فشار هیدروژن تامین شده از تانک ذخیره ی هیدروژن را افزایش می دهد و بدین ترتیب با یک پاسخ زمانی زیر ۰/۱ ثانیه سیستم خود را اصلاح می کند.

توان و بازده سیستم به ترتیب در شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه توان پیل سوختی، توان مصرفی کمپرسور و توان خالص تولیدی سیستم

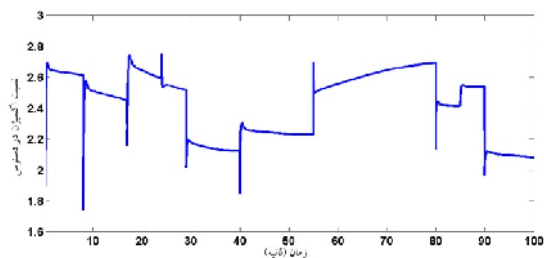


شکل ۱۱: منحنی بازده پیل سوختی و بازده کلی سیستم

مقدار جریان هوای تامین شده به کاتد معمولاً توسط پارامتر نسبت اکسیژن در دسترس، λ_{O_2} معرفی می شود. این پارامتر همان نسبت مقدار اکسیژن تامین شده به کاتد به مقدار اکسیژن مصرفی در کاتد است.

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2, in}}{W_{O_2, react}} \quad (15)$$

مقدار بالای نسبت اکسیژن در دسترس باعث افزایش فشار جزئی اکسیژن کاتد می شود. هر چه فشار جزئی اکسیژن بالاتر رود توان تولیدی پیل سوختی و توان خالص سیستم افزایش می یابد. با این حال برای رسیدن به فشار بالاتر نیاز به مصرف توان بیشتری در کمپرسور داریم. هنگامی که جریان با یک پله مثبت افزایش می یابد، مقدار اکسیژن در دسترس کاتد کاهش می یابد حال اگر کمپرسور با افزایش ولتاژ دبی بیشتری را تولید کند این کاهش مقدار اکسیژن را جبران خواهد نمود.



شکل ۱۱: منحنی نسبت اکسیژن در دسترس در طی شبیه سازی دینامیکی

توان خالص تولیدی توسط سیستم، همان گونه که در رابطه (۱۶) آمده است، برابر اختلاف توان تولیدی در پیل سوختی و توان مصرفی در اجزایی مانند کمپرسور، پمپ ها و فن سیستم است.

$$P_{net} = P_{gross} - P_{cp} - \sum P_{pomp} - \sum P_{fan} \quad (16)$$

از آن جایی که توان مصرفی در پمپ ها و فن سیستم در مقایسه با توان مصرفی کمپرسور بسیار کوچک است، از این توان ها صرف نظر کرده و تنها توان مصرفی در سیستم را توان کمپرسور در نظر می گیریم. توان مصرف شده توسط کمپرسور از رابطه (۱۷) به دست می آید.

$$P_{cp} = C_p \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left(\left(\frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) W_{Cr} \quad (17)$$

بازده سیستم نیز از رابطه (۱۸) به دست می آید.

$$\eta_{fc} = \frac{P}{W_{H_2} LHV_{H_2}} \quad (18)$$

ولتاژ ترمینال پیل سوختی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است تغییرات در فشار جزئی اکسیژن کاتد که در اثر تغییر جریان کشیده شده از پیل سوختی اتفاق می افتد یک اثر گذرا در ولتاژ

جریان دارد تا در آن با کمترین تلفات بیشترین بازده را داشته باشد. با توجه به نمودارهای ارائه شده بهترین محدوده برای چگالی جریان پیل سوختی بین 0.75 و $1 \text{ (A/cm}^2\text{)}$ است.

تشکر و قدردانی

از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت به دلیل حمایت مالی تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

[۱] J.T. Pukrushpan, H. Peng, A.G. Stefanopoulou "Simulation and Analysis of Transient Fuel Cell System Performance Based on a Dynamic Reactant Flow Model" IMCE Paper, ۲۰۰۲-DSC-۳۲۰۵۱, ۲۰۰۲.

[۲] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng "Control of FC Breathing" IEEE Control Systems Magazine, ۲۷۲-۱۷۰۸, ۳۰ - ۴۶, ۲۰۰۴.

[۳] Frano Barbir "PEM FCs: Theory and Practice" Elsevier Academic Press, ۴۵۶ pp., ISBN ۰۱۲۰۷۸۱۴۲۵, (۲۰۰۵).

[۴] K. Rajashekara " Propulsion System Strategies for FC Vehicles" SAE Paper, ۲۰۰۰-۰۱-۰۳۶۹, ۲۰۰۰.

[۵] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Bose, A. Laperrière "Characterization of a Ballard MK -E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack" Fuel Cell Journal, , - , .

[۶] N. Yamaguchi, A. Iwai, T. Fukushima, H. Shinoki "New Drive Motor for Fuel Cell Vehicle FCX Clarity" SAE Paper, ۲۰۰۹-۰۱-۱۰۰۱, ۲۰۰۹.

[۷] A. Schell, H. Peng, D. Tran, E. Stamos, C.C. Lin, M.J. Kim "Modelling and Control Strategy Development for FC Electric Vehicles" Annual Reviews in Control, ۲۹, ۱۵۹-۱۶۸, ۲۰۰۵.

[۸] J. Marshall, M. Kazerani "Design of an Efficient Fuel Cell Vehicle Drive train, Featuring a Novel Boost Converter" IEEE Control Systems Magazine, ۰-۷۸۰۳-۹۲۵۲-۳, ۲۰۰۵.

[۹] T. Yalcinoz, M. Alam "Improved Dynamic Performance of Hybrid PEM Fuel Cells and Ultra Capacitors for Portable Applications" International Journal of Hydrogen Energy, ۳۳, ۱۹۳۲-۱۹۴۰, ۲۰۰۸.

[۱۰] J.M. Cunningham, M.A. Hoffman, R.M. Moore, D.J. Friedman "Requirements for a Flexible and Realistic Air Supply Model for Incorporation into a Fuel Cell Vehicle (FCV) System Simulation" SAE Paper, ۱۹۹۹-۰۱-۲۹۱۲, ۱۹۹۹.

[۱۱] J.A. Adams, W.C Yang, K.A. Oglesby, K.D. Osborne "The Development of Ford's P۲۰۰۰ FC Vehicle" SAE Paper, ۲۰۰۰-۰۱-۱۰۶۱, ۲۰۰۰.

توان پیل سوختی ارتباط مستقیمی با فشار جزئی مواد واکنش دهنده در کاتد و آند دارد. همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار توان تولیدی در پیل سوختی دقیقاً از الگوی فشار تامینی به کاتد و آند تبعیت می‌کند. برای محاسبه توان خالص تولیدی توسط سیستم تنها توان مصرفی در کمپرسور را در نظر می‌گیریم و از توان مصرف شده در پمپ خنک‌کاری و پمپ تامین آب و توان مصرفی رطوبت‌زن صرف نظر می‌کنیم. پاسخ سیستم به تغییرات فشار کاتد در حدود ۰.۴ ثانیه است.

بازده پیل سوختی با افزایش دبی و افزایش نرخ واکنش بازده پیل سوختی در محدوده ۰.۴۷ تا ۰.۵۲۵ باقی می‌ماند، شکل (۱۱). در جریان‌های بالا (بعد از ثانیه ۸۹) به علت افزایش تلفات اهمی، غلظتی و انرژی فعال سازی افت شدیدی در بازده سیستم تولید توان داریم. برای همین در طراحی سیستم معمولاً ترجیح داده می‌شود تا سیستم در جریان کم و ولتاژ بالا کار کند. در این صورت تلفات سیستم کمتر خواهد بود و بازده افت ناگهانی نخواهد داشت. در چگالی جریان‌های بالاتر از 1.2 A/cm^2 توان مصرفی کمپرسور بسیار زیاد خواهد بود.

مدل سیستم پیل سوختی توانایی این را دارد که اثرات گذرای فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن و همچنین رطوبت غشا را به‌روزی و ولتاژ تولیدی ثبت کند. با وجود اینکه این مدل با اطلاعات حاصل از مطابقت داده نشده است، اما این مدل رفتار گذرای به‌دست آمده توسط مدل‌سازی و گزارش شده در مراجع [۸] و [۱۲] و [۱۳] را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری

برنامه ریزی کمپانی‌های خودروسازی بزرگ جهان برای تولید انبوه خودروهای پیل سوختی تا سال ۲۰۲۰ است. از این رو تلاش زیادی در سال‌های اخیر برای پیشرفت و بسترسازی برای تولید این خودروها انجام شده است. در این مقاله با استفاده از اطلاعات خودروی فورد پی ۲۰۰۰ سیستم انتقال قدرت این خودرو مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

نتایج به‌دست آمده در این مدل هم‌خوانی مناسبی با نتایج به‌دست آمده در کارهای آزمایشگاهی مراجع قبلی دارد. تغییرات فشار جزئی واکنش‌دهنده‌ها در طول عملکرد خودرو، نقش اصلی را در مقدار توان تولیدی و بازده خودرو دارد. برای اینکه پیل سوختی به عملکرد خود با بازده و توان بالا ادامه دهد لازم است تا فشار کاتد و آند در هر لحظه با هم برابر باشند. برای این منظور ما به کنترلر نیازمندیم تا با دانستن فشار کاتد و آند در هر لحظه فشار خروجی شیر مخزن هیدروژن را تنظیم کند. برای این کار یک کنترلر تناسبی با نسبت تناسب ۰.۹۴ طراحی شده است.

چگالی جریانی که از پیل سوختی کشیده می‌شود، باعث ایجاد توان در موتور الکتریکی می‌گردد. هرچه جریان کشیده شده از پیل سوختی بالاتر باشد توان تولیدی بالاتر می‌رود، اما این افزایش جریان باعث افزایش تلفات اهمی داخل پیل سوختی و نیز نیروی ضد محرکه‌ی موتور الکتریکی می‌شود. برای داشتن بازده بالا و نیز توان تولیدی مناسب پیل سوختی احتیاج به محدوده‌ای از

[۱۲] F. Lui, B. Yi, D. Xing, J. Yu, Z. Hou, Y. Fu
“Development of Novel Self-Humidifying Composite
Membranes for Fuel Cells” Journal of Power Sources,
۱۲۴, ۸۱-۸۹, ۲۰۰۳.

[۱۳] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K.
Agbossou, M. Fournier, T.K. Bose, A. Laperrière
“Characterization of a Ballard MK۵-E Proton Exchange
Membrane Fuel Cell Stack” Fuel Cell Journal, ۱, ۶۶-۷۱,
۲۰۰۱.