



PSC 2007

98-F-REN-195

ارائه مدلی دقیق برای پیل سوختی الکترولیت پلیمری با در نظر گرفتن اثر دما

علی اصغر قدیمی

حسن رستگار

عباس مولوی داریانی

دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)

تهران

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی الکترولیت پلیمری، تولید پراکنده، مدل دینامیکی، دما، Simulink

چکیده:

در این مقاله مدل‌سازی و شبیه‌سازی پیل سوختی الکترولیت پلیمری انجام شده است. در این مدل اثر هر یک از عوامل دینامیکی لایه دوگانه بار، لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی و واحد پردازنده سوخت با در نظر گرفتن اثر تغییرات دمای پیل سوختی در پارامترهای مدل انجام شده است. پارامترهای مدل پیل سوختی به دما وابسته می‌باشند، بنابراین برای افزایش دقت مدل بایستی تغییرات دمای پیل سوختی از لحظه راه‌اندازی تا بار کامل در نظر گرفته شود. در این مقاله توسط شبیه‌سازی این واحدها، اثر هر یک از آنها در مدل ارائه شده نشان داده شده است. همچنین با شبیه‌سازی پیل سوختی در دو حالت دما ثابت و دما متغیر اثر در نظر گرفتن دما بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از Simulink/Matlab مشخص می‌کند که برای پیل سوختی نمونه ۵ کیلوواتی، برای زمانهای بزرگتر از ۶۰ ثانیه و یا شرایط اولیه باری با توان مصرفی کمتر از توان نامی پیل، مدل‌سازی دما در افزایش دقت مدل تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

۱- مقدمه

نگرانی‌های زیست محیطی جهانی و افزایش نیاز به استفاده از انرژی، باعث ایجاد فرصت‌های جدیدی برای استفاده عمومی از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. در این میان استفاده از پیل سوختی برای مقاصد تولید پراکنده^۱، تولید محلی جدا از شبکه، وسایل نقلیه، برق اضطراری و تجهیزات فضایی مورد توجه است [۱].

پیل سوختی دارای مزیت‌های ذیل می‌باشد: ۱- بازدهی بالا (۴۰ تا ۶۰ درصد) ۲- عدم آلودگی زیست محیطی ۳- دارای ساختار انعطاف پذیر بر حسب توان مورد نیاز ۴- قابل حمل بودن ۵- نسبت به توانی که تولید می‌کند فضای کمی اشغال می‌کند. ۶- قابلیت ترکیب شدن با سیستم‌های دیگر ۷- تولید انرژی با استفاده از گرمای خروجی ۸- آلودگی صوتی بسیار پایین. مشکلاتی که بر سر راه گسترش تکنولوژی پیل سوختی وجود دارند عبارتند از: ۱- هزینه بسیار بالا بدلیل مواد مورد استفاده در آنها ۲- پیچیدگی طراحی و ساخت ۳- حساسیت

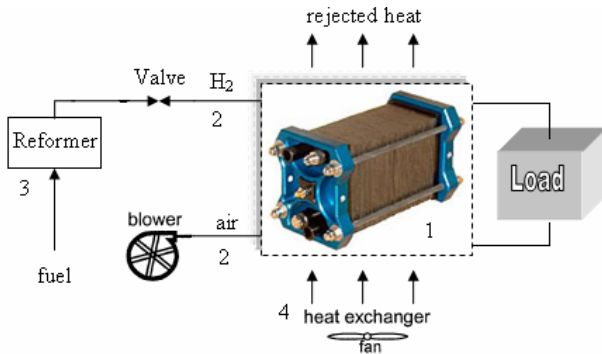
¹- Distributed Generation

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

کامل در مدل لحاظ شده است. در نتیجه یک مدل کامل از پیل سوختی الکترولیت پلیمری برای استفاده مهندسی برق در مطالعات شبکه قدرت و تولید پراکنده ارائه شده است.

۲- اجزای پیل سوختی

اجزای پیل سوختی الکترولیت پلیمری در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختمان پیل سوختی الکترولیت پلیمری

این سیستم دارای بخش‌های ذیل می‌باشد:

۱- پشته^۱ پیل سوختی ۲- لوله‌های تغذیه کننده هیدروژن و هوا به پیل سوختی ۳- رفورمر یا پردازنده سوخت ۴- سیستم خنک کننده.

موقعیت هر یک از اجزا روی شکل با شماره‌های متناظر مشخص شده است. در بخش بعدی مدلسازی هر یک از این اجزا شرح داده شده است.

۳- مدلسازی

۳-۱- پشته پیل سوختی الکترولیت پلیمری

ولتاژ خروجی هر سلول پیل سوختی مقدار کوچکی است، در نتیجه برای بدست آوردن ولتاژ خروجی بزرگتر تعدادی سلول پیل سوختی را به صورت سری، توسط صفحات دو قطبی به هم متصل کرده و پشته پیل سوختی را ایجاد می‌نمایند. برای بدست آوردن مدل پشته پیل سوختی، ابتدا مدل یک سلول تنها را بدست می‌آوریم.

بالا نسبت به ناخالصی سوخت مورد استفاده ۴- نیاز به نیروی متخصص برای تعمیر و نگهداری [۲].

پیل‌های سوختی، سلول‌های الکتروشیمیایی تولید کننده جریان الکتریسیته می‌باشند، که از دو رسانا به نام الکترود و بافت رسانایی بین الکترودها به نام الکترولیت تشکیل شده‌اند. پیل‌های سوختی با توجه به نوع الکترولیت بکار رفته در آنها انواع مختلفی دارند، که عبارتند از:

پیل سوختی الکترولیت پلیمری، پیل سوختی آلکالین، پیل سوختی اسید فسفریک، پیل سوختی کربنات مذاب و پیل سوختی اکسید جامد.

در میان انواع مختلف پیل سوختی اشاره شده، پیل سوختی الکترولیت پلیمری به دلیل دما و فشار کاری پایین و چگالی توانی بالا نسبت به دیگر انواع پیل سوختی برای مقاصد تولید محلی و خودروهای هیدروژنی مناسب است. دمای کاری بهینه کارکرد آنها زیر ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. محدوده توانی این نوع پیل‌ها از چند ده وات تا چند صد کیلووات بسته به محل کاربرد می‌تواند متغیر باشد [۱][۳]. برای استفاده از این انرژی پاک و تبدیل آن به شکل مطلوب مصرف کننده از ادوات الکترونیک قدرت بهره می‌گیرند [۴].

بطور کلی مدلسازی‌های انجام شده برای پیل سوختی به دو دسته تقسیم می‌شود: مدل‌های نظری که بر اساس قوانین فیزیکی بدست می‌آیند [۷-۵]، و مدل‌های شبه تجربی که بر اساس تست‌های عملی استوارند [۹-۸]. در مدل ارائه شده در مرجع [۵] تغییرات دما در حین کار و تلفات انتقال جرم و اثر لایه دوگانه بار در نظر گرفته نشده است. همچنین در مدل مراجع [۸-۱۰] دینامیک دمای پیل سوختی و اثر لوله‌های سوخت رسانی در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که تغییرات دما و فشار جزئی گازها بر مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی پیل سوختی تأثیرگذار می‌باشند.

در مدل ارائه شده برای مدل کردن عملکرد الکترولیت و الکترودها از مدل‌های نظری و برای مدل کردن لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی و واحد پردازنده سوخت از مدل‌های شبه تجربی استفاده شده است؛ همچنین با مدل کردن دمای پیل سوختی اثر تغییرات دما از لحظه راه‌اندازی تا بار

¹- Stack

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

$$V_{ohm} = i_{FC}(R_M + R_C) \quad (4)$$

در رابطه فوق R_C مقاومت الکترودها در مقابل عبور الکترون بوده و ثابت می‌باشد. R_M مقاومت الکترولیت در مقابل عبور یونها بوده و از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$R_M = \rho_M \frac{l}{A} \quad (5)$$

$$\rho_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^{2.5} \left(\frac{T}{303} \right)^2 \right]}{\left[\Psi - 0.634 - 3 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left(4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right)} \quad (6)$$

که در آن ρ_M مقاومت ویژه غشا ($\Omega \cdot cm$)، A مساحت مؤثر سلول (cm^2) و l ضخامت غشا (cm) می‌باشد.

V_{act} بیان کننده افت ولتاژ فعالسازی در الکترودهای آند و کاتد است. افت ولتاژ فعالسازی بدلیل کندی واکنش‌ها روی سطح الکترودها می‌باشد؛ و از رابطه (۷) به دست می‌آید [۸].

$$V_{act} = - \left[\zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 T \ln(i_{FC}) \right] \quad (7)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 * 10^{-6} \exp \left(- \frac{498}{T} \right)} \quad (8)$$

در رابطه (۷)، i_{FC} ، جریان نقطه کار پیل سوختی بر حسب آمپر و ζ ها پارامترهای مدل را نشان می‌دهند، که این مقادیر بر مبنای معادلات تئوری از اصول ترمودینامیک الکتروشیمی بدست می‌آیند. C_{O_2} ، غلظت اکسیژن در سطح کاتالیزور و بر حسب $\frac{mol}{cm^3}$ می‌باشد و از معادله (۸) به دست می‌آید.

V_{con} نشان دهنده افت ولتاژ به علت کاهش غلظت مواد واکنش دهنده می‌باشد که به آن تلفات انتقال جرم نیز گفته می‌شود. برای تعیین مدل افت ولتاژ انتقال جرم یا افت ولتاژ غلظت باید چگالی جریان ماکزیمم (J_{max}) تعیین شود. چگالی جریان ماکزیمم چگالی جریانی است، که در آن چگالی جریان، حداکثر مقدار سوخت مصرف می‌شود و به علت آنکه سوخت با نرخ بیشتری قادر به مصرف نمی‌باشد، چگالی جریان سلول هیچگاه از این مقدار تجاوز نخواهد کرد. مقادیر نمونه برای J_{max} در رنج ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی آمپر بر سانتی

عملکرد پیل سوختی در حالت دائم توسط منحنی پلاریزاسیون بیان می‌شود که ولتاژ پیل سوختی را بر حسب جریان آن نمایش می‌دهد. فاکتورهای اصلی که بر منحنی پلاریزاسیون تأثیر گذارند عبارتند از:

- فشار جزئی هیدروژن
- فشار جزئی اکسیژن
- دما
- میزان رطوبت غشای الکترولیت

ولتاژ خروجی پیل سوختی در منحنی پلاریزاسیون توسط معادله (۱) بیان می‌شود [۸] [۱۰].

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{ohmic} - V_{activation} - V_{concentration} \quad (1)$$

در معادله فوق، E_{Nernst} بیان کننده ولتاژ مدار باز و بدون تلفات در پیل سوختی می‌باشد. این ولتاژ از معادله نرنست بدست می‌آید که به صورت زیر است:

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲) ΔG بیان کننده تغییرات در انرژی آزاد گیبس بر حسب ژول بر مول ($\frac{J}{mol}$)، ΔS بیان کننده تغییرات آنتروپی ($\frac{J}{mol}$)، F بیان کننده ثابت فارادی ($\frac{C}{mol}$) (۹۶۴۸۵/۳۴) و P_{O_2} و P_{H_2} به ترتیب بیان کننده فشار جزئی هیدروژن و فشار جزئی اکسیژن بر حسب اتمسفر می‌باشند. R ثابت جهانی گازهاست؛ ($\frac{J}{mol \cdot K}$) (۸/۳۱۴) و T دمای پیل سوختی بر حسب کلوین می‌باشد؛ و T_{ref} دمای مرجع (۲۵ درجه سانتیگراد) بر حسب کلوین می‌باشد. با استفاده از فشار و دمای استاندارد مقادیر ΔG ، ΔS و T_{ref} به دست می‌آید و رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) خواهد شد.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 * 10^{-3} * (T - 298.15) + 4.31 * 10^{-5} * T * \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (3)$$

V_{ohmic} ، نشان دهنده افت ولتاژ اهمی است که به سبب مقاومت در برابر حرکت الکترون‌ها و یونها ایجاد می‌شود و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۸].

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

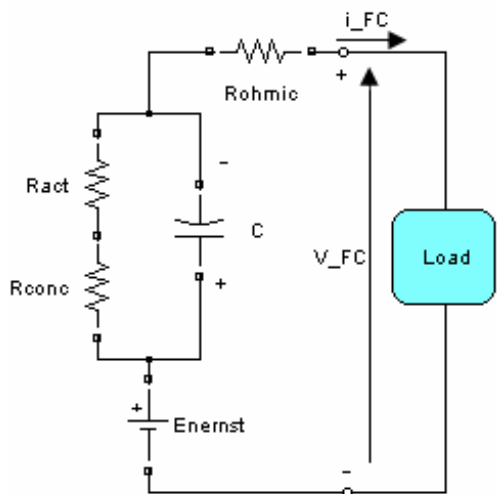
باعث ایجاد میدان الکتریکی در آن ناحیه و در نتیجه ایجاد اختلاف پتانسیل در سطح پیوند می‌شود که باعث جلوگیری از نفوذ بیشتر الکترون و حفره می‌شود. در سیستم‌های الکتروشیمیایی نیز لایه دوگانه بار مانند قطعات نیمه هادی به وجود می‌آید و علت آن حرکت الکترونها از الکتروود به سمت الکتروولیت و همچنین حرکت یونها از الکتروولیت به الکتروودها می‌باشد لایه دوگانه بار باعث ذخیره بار الکتریکی و در نتیجه انرژی در سطح پیوند می‌شود و شبیه خازن عمل می‌نماید. بنابراین ولتاژ تولید شده توسط لایه دوگانه بار نمی‌تواند فوراً تغییرات جریان را دنبال نماید، بر خلاف افت ولتاژ اهمی که فوراً تغییرات جریان را دنبال می‌نماید. برای مدلسازی لایه دوگانه بار آن را به وسیله خازن مدل می‌نماییم. (شکل (۲)) که در این صورت مدل الکتریکی پیل سوختی به صورت معادلات زیر خواهد بود:

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} i_{FC} - \frac{v_C}{\tau} \quad (13)$$

$$\tau = C \cdot (R_{act} + R_{conc}) = C \cdot \left(\frac{V_{act} + V_{conc}}{i_{FC}} \right) \quad (14)$$

$$V_{FC} = E_{Nemst} - v_C - V_{ohm} \quad (15)$$

که τ ثابت زمانی ایجاد شده توسط افت ولتاژهای فعالسازی و غلظت می‌باشد. برای مثال مقدار خازن در معادلات بالا برای پیل سوختی Ballard Mark V با توان نامی ۵ kW و سطح مقطع 232 cm^2 ، مقدار ۳ فاراد می‌باشد [۱۱].



شکل (۲): نحوه قرارگیری خازن اثر لایه دوگانه بار

مترمربع می‌باشد. افت ولتاژ به سبب انتقال جرم از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱].

$$V_{con} = -\frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (9)$$

اگرچه الکترولیت پیل سوختی برای هدایت یونها انتخاب شده است، ولی همیشه توانایی عبور مقدار خیلی کمی الکترون را نیز دارا می‌باشد. مشابه حامل‌های اقلیت در نیمه هادی‌ها و همچنین احتمالاً در حالت کاری پیل سوختی مقداری مولکول هیدروژن از طریق الکترولیت آند به کاتد نفوذ خواهد کرد و به علت وجود کاتالیزر به طور مستقیم با اکسیژن واکنش می‌دهد. بدون اینکه جریانی از مدار خارجی عبور نماید. این مقدار کوچک هیدروژن، که در میان الکترولیت مهاجرت می‌کند، به عنوان تلفات عبور سوخت شناخته می‌شود. چگالی جریان معادل با میزان مصرف سوخت در حالت بی باری را با J_n نشان می‌دهیم. بنابراین جریان پیل سوختی مورد استفاده در مدل بصورت رابطه (۱۰) اصلاح می‌شود.

$$i_{FC} = \left(\frac{i_{Load}}{A} + J_n \right) \times A \quad (10)$$

ولتاژ یک پشته پیل سوختی شامل n سلول پیل سوختی از رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$V_{FC,stack} = n \cdot V_{FC,cell} \quad (11)$$

و توان پیل سوختی از رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$P_{FC} = V_{FC,stack} \cdot I_{FC} \quad (12)$$

۳-۱-۱- لایه دوگانه بار^۱

در پیل سوختی پدیده ای به نام لایه دوگانه بار وجود دارد. اگر ماده مختلف که دارای بارهای غیر همنام می‌باشند در تماس با یکدیگر قرار بگیرند، در این صورت بار از یک ماده به ماده دیگر منتقل می‌شود و بین دو ماده را ناحیه‌ای تهی از بار در بر می‌گیرد، که باعث ایجاد اختلاف پتانسیلی در بین دو ماده می‌شود. به عنوان مثال در مواد نیمه رسانا نفوذ الکترون از ناحیه N به ناحیه P و همچنین نفوذ حفره از ناحیه P به ناحیه N باعث ایجاد ناحیه تهی در محل پیوند می‌شود؛ که این خود

¹- Charge Double Layer

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - K_{H_2} P_{H_2} - 2K_r I) \quad (22)$$

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{ca}} (q_{O_2}^{in} - K_{O_2} P_{O_2} - K_r I) \quad (23)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات (22) و (23) و مرتب کردن آنها روابط (24) و (25) بدست می آیند که نحوه محاسبه فشار جزئی گازهای هیدروژن و اکسیژن را بیان می کند.

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (24)$$

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - K_r I) \quad (25)$$

که $\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RT \cdot K_{H_2}}$ و $\tau_{O_2} = \frac{V_{ca}}{RT \cdot K_{O_2}}$ است [6].

۳-۳- مدلسازی واحد پردازنده سوخت

هیدروژن سوخت اصلی پیل های سوختی است که از تفکیک آب، گاز طبیعی، ذغال سنگ، متانول و دیگر سوخت های هیدروکربنی بدست می آید. این مواد از دستگاهی به نام واحد پردازنده سوخت عبور می کنند تا هیدروژن از مواد کربنی آزاد شود. واحد پردازنده سوخت که در آن هیدروژن از متانول تهیه می گردد را می توان بصورت زیر مدل کرد [5].

$$\frac{q_{H_2}^{in}}{q_{methanol}} = \frac{CV}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1} \quad (26)$$

$q_{H_2}^{in}$ مقدار دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی است. در مدل آورده شده، مقدار CV با توجه به نوع سوخت وارد شده به واحد پردازنده سوخت به دست می آید، به عنوان مثال اگر سوخت ورودی به پردازنده سوخت گاز متان باشد، چون به ازاء هر مولکول گاز متان وارد شده به پردازنده سوخت، ۲ مولکول گاز هیدروژن حاصل می شود؛ بنابراین در این مورد مقدار CV برابر ۲ خواهد بود. رابطه مقدار دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی با میزان هیدروژن واکنش دهنده در آن بصورت رابطه (27) می باشد [6].

۲-۳- مدلسازی لوله های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی

مقدار گاز در یک حجم مشخص، با گاز ورودی منهای مجموع گاز خروجی و گاز مصرف شده در واکنش کانال آند یا کاتد، برابر است. فشار جزئی هیدروژن با استفاده از قانون گازهای ایده ال، از رابطه (18) به دست می آید [6].

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} RT \quad (16)$$

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (17)$$

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^{react}) \quad (18)$$

نرخ	هیدروژن	ورودی	به	آند	$mol \cdot s^{-1}$
					$q_{H_2}^{in}$
نرخ	هیدروژن	خروجی	از	آند	$mol \cdot s^{-1}$
					$q_{H_2}^{out}$
نرخ	هیدروژن	واکنش داده	در	آند	$mol \cdot s^{-1}$
					$q_{H_2}^{react}$
	حجم آند				m^3
					V_{an}

روابط (16) تا (18) را می توان برای گاز اکسیژن نیز مانند گاز هیدروژن محاسبه کرد. نرخ مصرف هیدروژن و اکسیژن در پیل سوختی از روابط (19) و (20) به دست می آید.

$$q_{H_2}^{react} = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \quad (19)$$

$$q_{O_2}^{react} = \frac{N_0 I}{4F} = K_r I \quad (20)$$

از طرف دیگر برای مدل کردن دبی خروجی اکسیژن و هیدروژن با فرض اینکه اختلاف فشار ورودی و خروجی به اندازه ای است که اریفیس را چاک شده در نظر بگیریم، در اینصورت نسبت نرخ گاز خروجی به فشار جزئی گاز در داخل مقداری ثابت می باشد.

$$\frac{q_{H_2}^{out}}{P_{H_2}} = K_{H_2} \quad (21)$$

با استفاده از معادله های (21) - (18) روابط زیر بدست می آیند:

ثابت Stefan-boltzman (۸-۱۰*۶۷/۵) $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$

σ

جرم آب تولیدی

$$m_{H_2O, produced} = \frac{I \cdot n_{cell} \cdot M_{H_2O}}{2F}$$

جرم مولی آب gram

M_{H_2O}

گرمای نهان تبخیر آب $j \cdot g^{-1}$

l_{evap}

نسبت آب تبخیر شده به کل آب تولید شده

β

ضریب انتقال حرارت همرفتی بین ۲۵ تا ۲۵۰ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$

برای حالت استفاده از جریان هوای اجباری^۱ و بین ۵ تا ۵۰

$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ برای جریان هوای طبیعی^۲ می باشد [۱۴]. در

این مقاله از سیستم خنک کننده دارای فن که هوا را به میان

سلول های پشته می دمد، استفاده شده است. سرعت چرخش

فن متناسب با جریان خروجی پیل سوختی نظر گرفته شده

است. در نتیجه به تناسب آن ضریب انتقال حرارت همرفتی در

محدوده مجاز ۲۵ تا ۲۵۰ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ تغییر می کند. برای

محاسبه دمای پیل سوختی بایستی معادله (۳۳) را حل کرد.

$$M_{FC} \cdot C_{FC} \frac{dT_{stack}}{dt} = Q_{generated} - (Q_{conv} + Q_{evap} + Q_{rad}) \quad (33)$$

جرم کلی پیل سوختی kg

M_{FC}

ظرفیت گرمایی ویژه پیل سوختی $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$

تعداد سلول های پیل سوختی

h_{stack}

تعداد سلول های پیل سوختی

n

سطح مؤثر یک سلول پیل سوختی m^2

A_{cell}

سطح خارجی یک پشته پیل سوختی m^2

$A_{exterior}$

$$q_{H_2}^{react} = \frac{q_{H_2}^{react}}{U} \quad 0.7 \leq U \leq 0.9 \quad (27)$$

۴-۳- مدلسازی دما

اگر تمام انرژی آزاد شده در واکنش شیمیایی پیل سوختی به الکتریسیته تبدیل شود یعنی در سیستم تلفات وجود نداشته باشد، در این صورت ولتاژ مدار باز برای یک سلول برابر با ۱/۴۸ ولت می باشد. اختلاف بین ولتاژ واقعی سلول و ولتاژ ماکزیم نشان دهنده مقدار انرژی است که به الکتریسیته تبدیل نشده و به صورت گرما آزاد شده است، بنابراین اگر آب تولیدی به صورت مایع باشد گرمای آزاد شده در یک پشته پیل سوختی حاوی n سلول برابر رابطه (۲۸) می باشد [۱].

$$Q_{generated} = (E_{max} - V_{cell_real}) \cdot I \cdot n_{cell} \quad (28)$$

$$E_{max} = \frac{\Delta H}{2F} = 1.48 \quad (29)$$

گرمای تولید شده در پیل سوختی از سه طریق زیر به محیط باز می گردد [۱۲-۱۳]:

- تلفات گرما از طریق همرفتی

- تلفات تابشی

- تبخیر سطحی آب تولیدی در کاتد

معادلات حاکم بر تلفات گرما بصورت زیر می باشد:

$$Q_{conv} = n \cdot A_{cell} \cdot h_{stack} (T_{stack} - T_{room}) \quad (30)$$

$$Q_{rad} = \sigma \cdot A_{exterior} \cdot (T_{stack}^4 - T_{room}^4) \quad (31)$$

$$Q_{evap} = l_{evap} \cdot \beta \cdot m_{H_2O, produced} \quad (32)$$

ضریب انتقال حرارت همرفتی $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$

۴- شبیه سازی

جهت بررسی مدل پیل سوختی ارائه شده کلیه قسمت های

شرح داده شده در بخش های قبلی در نرم افزار

Simulink/Matlab پیاده سازی شده است. شکل (۴) تا

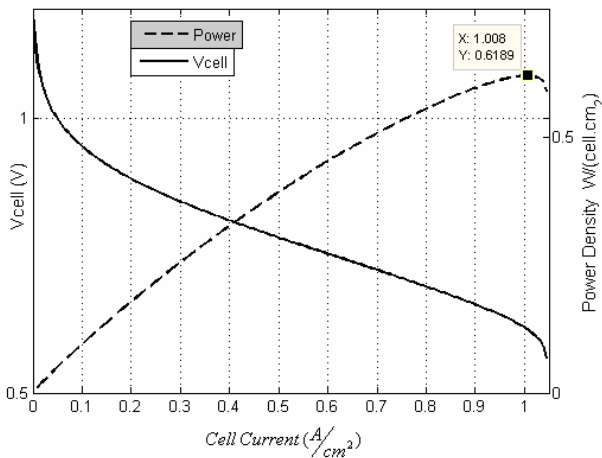
1- forced convection of air

2- natural convection of air

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

شده است. با توجه به شکل (۱۴) و شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که با افزایش بار دمایی پیل سوختی از مقدار اولیه به سمت مقدار نامی میل می‌کند. در ۲۰۰ ثانیه اول شبیه‌سازی بدلیل پایین‌تر بودن دمایی واقعی پیل سوختی از مقدار نامی خود اختلاف زیادی بین دو شکل موج دیده می‌شود، بعد از رسیدن دما به مقدار نامی خود این اختلاف به صفر می‌رسد. با کاهش بار در لحظه ۵۳۰ ثانیه دما شروع به کاهش یافتن می‌کند، ولی بدلیل کندی دینامیک دما اختلاف ایجاد شده مابین دو شکل موج اندک می‌باشد. این اختلاف در بین دو شکل موج ولتاژ بعد از ۶۰ ثانیه از شروع کاهش بار، قابل ملاحظه می‌باشد. شکل (۱۶) فشار جزئی اکسیژن و هیدروژن و مقدار دبی ورودی هیدروژن را نشان می‌دهد.

در این مقاله برای نمونه از یک پیل سوختی 5kW استفاده شد. با تغییر تعداد سلول‌ها و تنها با تغییر پارامترهای وزن و ابعاد پیل سوختی می‌توان همین آزمایش‌ها را برای پیل‌هایی با توان‌های مختلف انجام داد.



شکل (۳): منحنی پلاریزاسیون و نمودار چگالی توان یک سلول پیل

$$T = 65^{\circ}C \text{ سوختی در فشار و دمای}$$

$$P_{H_2} = 1atm \quad P_{O_2} = 0.2095atm$$

شکل (۸) بلوک دیاگرام قسمت‌های مختلف پیل سوختی را نشان می‌دهد. مشخصات پیل سوختی مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. منحنی پلاریزاسیون یک سلول پیل سوختی و نمودار چگالی توان در شکل (۳) مشخص شده است. با افزایش تعداد سلول‌ها یا سطح مؤثر پیل سوختی می‌توان توان مورد نیاز را بدست آورد. ماکزیمم توان پیل سوختی برای کل ۸۰ سلول و سطح مؤثر ۱۰۰ سانتیمتر مکعب با توجه به شکل (۳) از رابطه بدست می‌آید:

$$P_{max,stack} = P_{max,cell} \cdot n \cdot A = 0.6189 \cdot 80 \cdot 100 \approx 5kW \quad (34)$$

نقطه کار پیل سوختی بایستی همواره سمت چپ نقطه ماکزیمم مشخص شده در شکل (۳) انتخاب گردد.

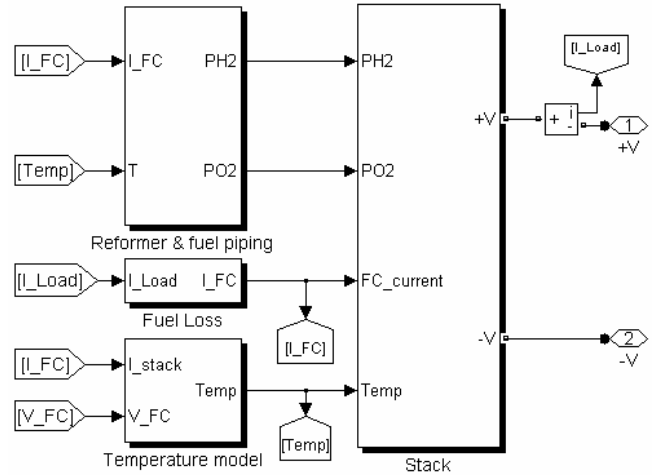
در آزمایش اول برای اعمال بار به پیل سوختی، در فواصل زمانی ۰/۵ ثانیه ۴ عدد مقاومت ۳ اهمی را بصورت پله‌ای وارد و سپس خارج می‌کنیم. نحوه تغییرات توان پیل سوختی در طی این آزمایش در شکل (۹) آورده شده است. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که اثر خازن لایه دوگانه بار در زمان‌های کوچکتر از دهم ثانیه قابل مشاهده می‌باشد. بار دیگر آزمایش اول را بدون خازن لایه دوگانه بار تکرار می‌کنیم. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که پیل سوختی دارای پرش‌های ناگهانی در ولتاژ خواهد بود.

در آزمایش دوم مانند آزمایش اول ولی با فواصل زمانی ۲۰ ثانیه بار را بصورت پله‌ای وارد و سپس خارج می‌کنیم. نتایج آزمایش دوم در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که دما دارای ثابت زمانی بسیار بزرگتر از ۲۰ ثانیه می‌باشد و دینامیک مشاهده شده مربوط به واحد پردازنده سوخت و لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی می‌باشد.

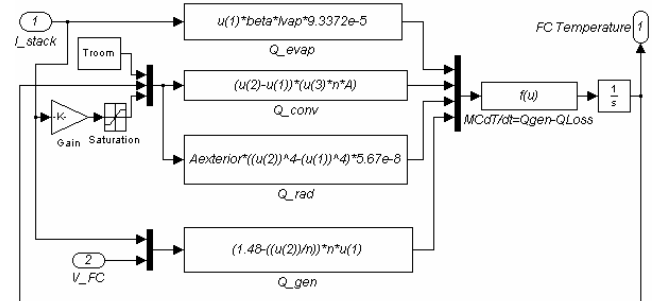
در آزمایش سوم بار را بصورت پله‌ای افزایش داده و صبر می‌کنیم، تا دما به حالت ماندگار خود برسد. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که دمایی پیل سوختی دارای ثابت زمانی در حد چند صد ثانیه می‌باشد.

آزمایش چهارم را در دو حالت دما ثابت و دما متغیر از بی‌باری تا بار کامل و بالعکس انجام شده است. مقدار دما در حالت دما ثابت ۶۵ درجه (مقدار نامی) سانتیگراد می‌باشد و دمایی اولیه پیل سوختی در حالت دما متغیر ۲۷ درجه سانتیگراد فرض

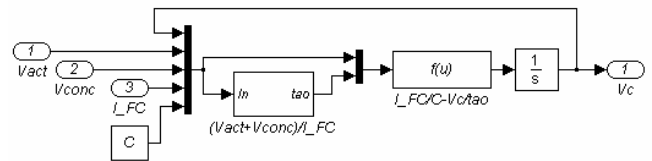
بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق



شکل (۴): مدل سازی پیل سوختی الکترولیت پلیمری در Simulink



شکل (۵): مدل سازی دما

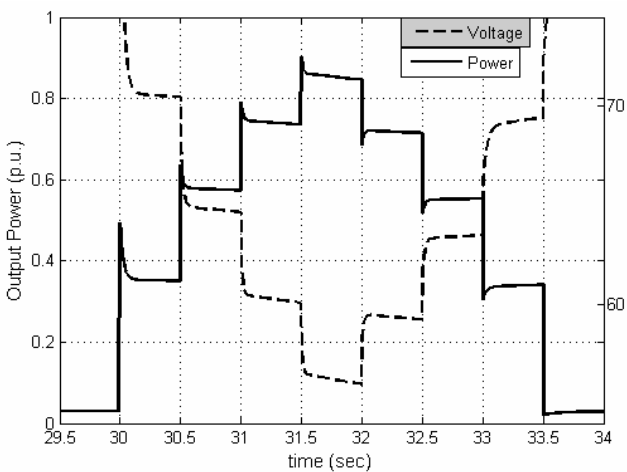


شکل (۶): مدل سازی اثر لایه دوگانه بار

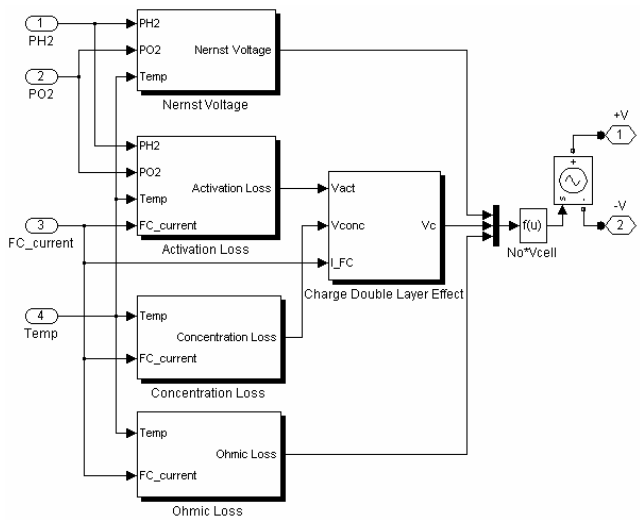
بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

Parameter	Value	Parameter	Value
n	80	Ψ	23
A	cm^2 100	J_n	$mA \cdot (cm^2)^{-1}$ 3
L_membrane	μm 178	J_{max}	$mA \cdot (cm^2)^{-1}$ 1050
T _{rated}	K 338	C	F 3
U	0.8	K_{H_2}	$mol \cdot (s \cdot atm)^{-1}$ 4.22×10^{-2}
F	$C \cdot (mol)^{-1}$ 96485.34	K_{O_2}	$mol \cdot (s \cdot atm)^{-1}$ 2.11×10^{-2}
R	$J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ 8.31447	τ_{H_2}	3.37 sec
R _c	Ω 0.0003	τ_{O_2}	6.74 sec
ζ_1	-0.948	r_{H-O}	1.168
ζ_2	$0.00286 + 0.0002 \ln A +$ $C_{H_2} (4.3 \times 10^{-5}) \ln($	Size	169×169×60 mm
ζ_3	7.6×10^{-5}	Weight	12 kg
ζ_4	-1.93×10^{-4}	T _{room}	300 K

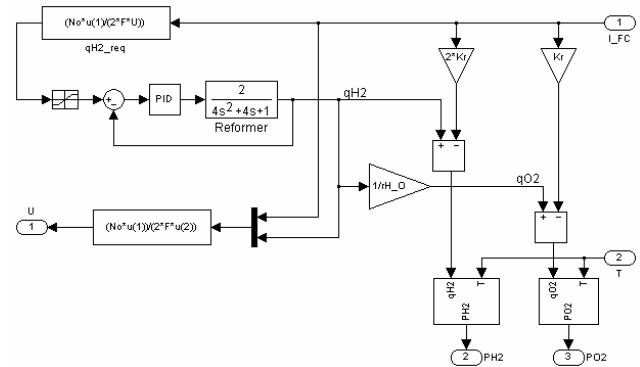
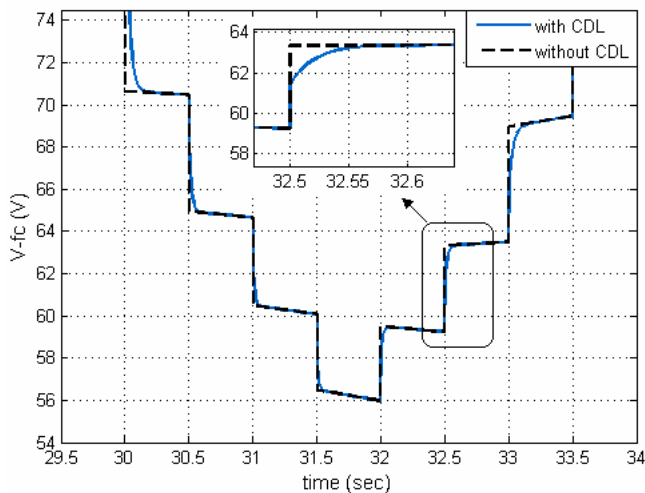
جدول (۱): پارامترهای پیل سوختی [۵] [۸] [۱۵]



شکل (۹): ولتاژ و توان پیل سوختی در تغییرات سریع بار (هر ۰/۵ ثانیه)

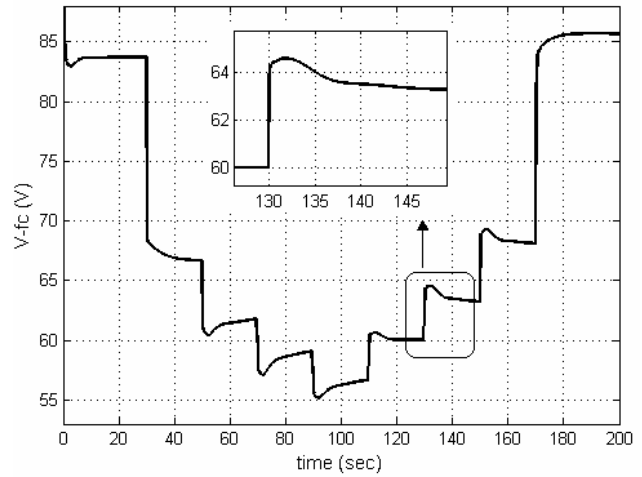
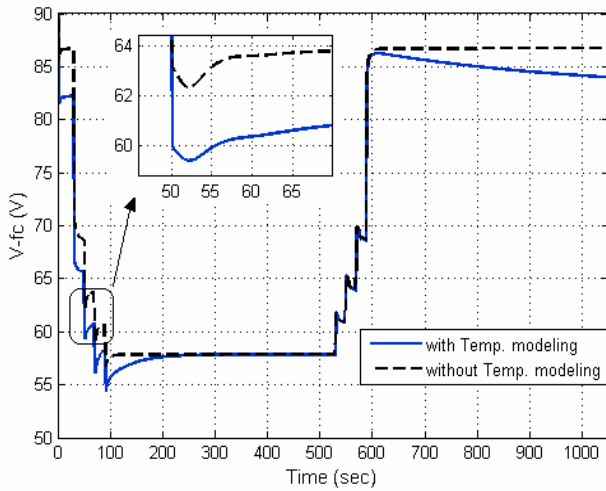


شکل (۷): مدلسازی پشته پیل سوختی الکترولیت پلیمری



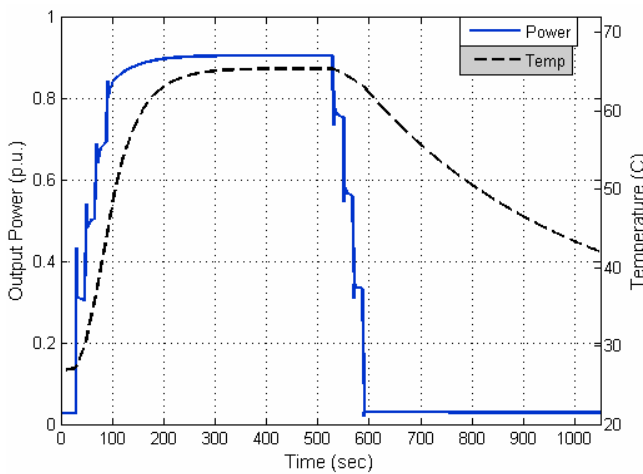
شکل (۸): مدلسازی لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی و واحد پردازنده سوخت

شکل (۱۰): اثر خازن لایه دوگانه بار بر ولتاژ پیل سوختی

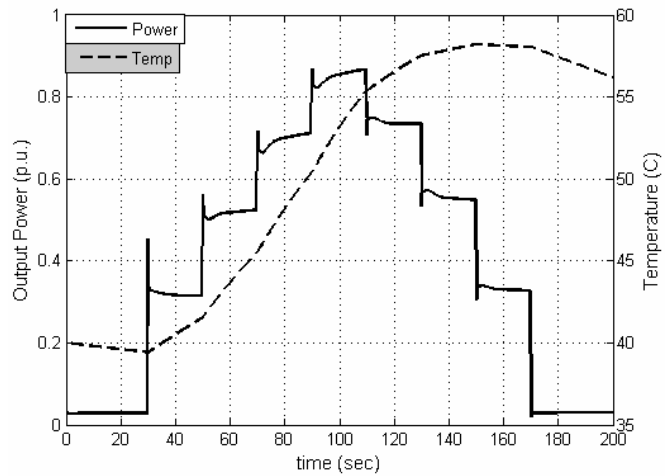


شکل (۱۱): ولتاژ پیل سوختی در تغییرات کند بار (هر ۲۰ ثانیه)

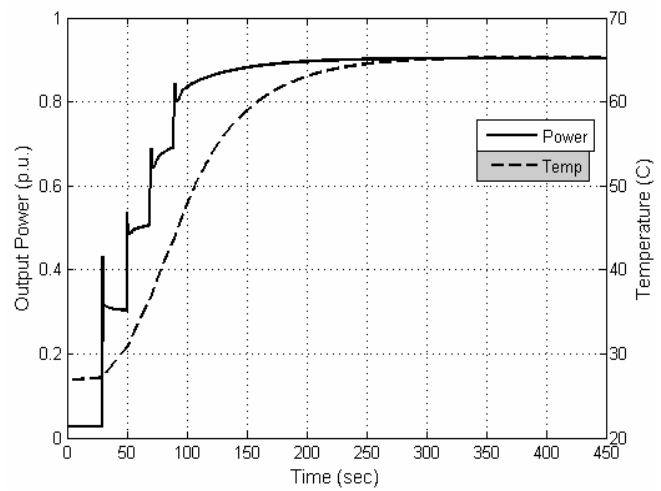
شکل (۱۴): ولتاژ پیل سوختی از بی‌باری تا بار کامل و بالعکس در آزمایش چهارم؛ در دو حالت دما ثابت ($T = 65^{\circ}C$) و با در نظر گرفتن دما ($T_{initial} = 27^{\circ}C$)



شکل (۱۵): دما و توان پیل سوختی سوختی آزمایش چهارم



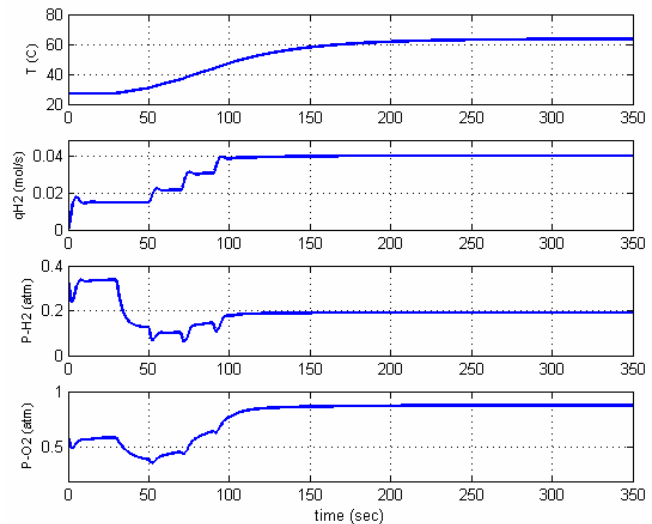
شکل (۱۲): توان و دمای پیل سوختی در تغییرات کند بار (هر ۲۰ ثانیه)



شکل (۱۳): توان و دمای پیل سوختی در پی افزایش پله‌ای بار

فهرست مراجع:

- EG&G Technical Services, Inc.;"Fuel Cell] 1[Handbook (Seventh Edition)", U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, November 2004
- [2] Phanikrishna Gomatom, Ward Jewell," Fuel Parameter and Quality Constraints for Fuel Cell Distributed Generators", Conference of the IEEE, pp. 409-412, 2003
- [۳] عباس مولوی داریانی؛ محمد شاهینی؛ حسن رستگار؛ علی اصغر قدیمی؛ "کنترل توان خروجی پیل سوختی بر مبنای هوش محاسباتی"، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۱۳۸۵
- [4] Ali Asghar Ghadimi, Abbas Molavi Daryani, Hassan Rastegar, "Detailed Modeling and Analysis of a Full Bridge PWM DC-DC Converter" Australian Universities Power Engineering Conference 2006, (AUPEC 06)
- [5] M. Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, and T. Thomas, "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications," J. Power Sources, vol. 138, no. 1-2, pp. 199-204, Nov. 2004
- [6] J. Padull'es, G.W. Ault, J.R. McDonald, "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation", J. Power Sources 86, pp. 495-500, 2000
- [7] A. Rowe, X. Li, "Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells", J. Power Sources 102, pp. 82-96, 2001
- [8] R.F. Mann, J.C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley and P. R. Roberge, "Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", Journal of Power Sources 86 (2000), pp. 173-180.
- [9] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, T.J. Harris, "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell. II. Empirical model development", Journal Soc. 142 (1995) 9-15. of Electrochem.
- [10] J.M. Correa, F.A. farret, L.N. Canha and M.G. Simoes, "An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane



شکل (۱۶): فشار جزئی اکسیژن و هیدروژن و مقدار دبی ورودی هیدروژن در پی افزایش پله‌ای بار (به ترتیب از پایین به بالا)

۵- نتیجه گیری

مدلسازی و شبیه‌سازی یک پیل سوختی الکترولیت پلیمری نمونه 5kW انجام شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی دینامیک پیل سوختی را میتوان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود: کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت. دینامیک کوتاه مدت پیل سوختی بدلیل وجود پدیده‌ای به نام لایه دوگانه بار می‌باشد؛ که دارای ثابت زمانی در حد دهم ثانیه می‌باشد. دیگر عامل دینامیکی، دینامیک میان مدت پیل سوختی به علت دینامیک واحد پردازنده سوخت و لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی می‌باشد؛ که دارای ثابت زمانی در حد چند ده ثانیه می‌باشد. در نهایت دینامیک بلند مدت پیل سوختی به دلیل مشخصات ترمودینامیکی پیل سوختی می‌باشد؛ که دارای ثابت زمانی در حد چند صد ثانیه می‌باشد.

با شبیه‌سازی پیل سوختی در دو حالت دما ثابت و دما متغیر اثر در نظر گرفتن دما را بررسی کردیم. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Simulink/Matlab مشخص می‌کند که برای پیل سوختی نمونه ۵ کیلوواتی، برای زمان‌های بزرگتر از ۶۰ ثانیه و یا شرایط اولیه باری با توان کمتر از توان نامی پیل سوختی، مدلسازی دما در افزایش دقت مدل تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

- [13] J. Wishart, Z. Dong, M. Secanell, "Optimization of a PEM fuel cell system based on empirical data and a generalized electrochemical semi-empirical model", *Journal of Power Sources* 161 (2006) 1041–1055
- [14] J.C. Amphlett, R.F. Mann, B. A. Peppley, P.R. Roberge and A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources* 61 (1996), pp. 183-188.
- [15] PALCAN FUEL CELLS LTD Fuel Cell Using an Electrochemical Model", *Industrial Electronics Society, IECON'01 .The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001,* pp. 141-146.
- [11] J. Larminie, A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, second ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [12] T. G. Burke and D. A. Schiller, "Using PSPICE for electrical heat analysis," *IEEE Potentials*, vol. 22, no. 2, pp. 35–38, Apr./May 2003.