



بررسی تجربی عملکرد یک استک پیل سوختی ۲/۵ کیلووات انتها بسته هیدروژن-اکسیژن با طراحی جدید برای افزایش بهره‌وری سوخت

ابراهیم علیزاده*، مجید خورشیدیان، سید حسین مسروری سعادت، سید مجید رهگشای، مظاهر رحیمی اسبویی

آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۵ فروردین ۱۳۹۶
پذیرش: ۱ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۷ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری
عملکرد انتها بسته
زمان تخلیه
استک مرحله‌ای

چکیده: پیل‌های سوختی پلیمری با آند و کاتد انتها بسته می‌توانند با سیستمی نسبتاً ساده درصد مصرف سوخت هیدروژن و اکسیدانت اکسیژن را افزایش دهند. در این مقاله یک طرح جدید برای استک پیل سوختی ارائه شده است که ایده اصلی طرح ارائه شده تقسیم استک به دو مرحله مجزا است. به این ترتیب که گاز خروجی از مرحله اول بعد از ورود به جداساز به مرحله بعدی وارد می‌شود. در طرح ارائه شده گرچه پیل سوختی در حالت انتها بسته کار می‌کند اما با توجه به مرحله‌ای بودن استک، بیش از ۸۵ درصد سلول‌ها در حالت استوکیومتری بزرگتر از ۱ کار می‌کنند و به این ترتیب طرح انتها بسته کارایی معادل به طرح انتها باز دارد. استک طراحی شده قادر است که به توان ۵/۲ کیلووات در چگالی جریان 1200 mA/cm^2 برسد در حالی که ولتاژ همگی سلول‌ها بزرگ‌تر از ۰/۶ ولت است. استک طراحی شده قادر است که توان را به بیش از ۳ کیلو وات افزایش دهد بدون این که به ولتاژ محدود کننده‌ی ۰/۴ ولت برسد. مطابق نتایج بهترین زمان برای باز و بسته کردن شیر تخلیه در حالت انتها بسته معادل با ۲ و ۴ ثانیه برای سلول‌های کاتدیک و ۲ و ۶ ثانیه برای سلول‌های آندیک است.

۱- مقدمه

امروزه پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون دما پایین به دلیل داشتن کارایی بالا، دمای پایین، شروع به کار سریع توجه زیادی را بخود جلب کرده است [۱]. پیل‌های سوختی مبدل‌های انرژی پاک می‌باشند که انرژی ذخیره شده در هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌نمایند [۲]. آن‌ها همچنین به علت دارا بودن چگالی توان بالا، شروع به کار سریع و آلودگی کم به عنوان جایگزین اصلی برای تولید توان اتومبیل‌ها، ایستگاه‌های توان ثابت و زیردریایی‌ها در نظر گرفته شده‌اند [۳].

در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون، هیدروژن به عنوان سوخت استفاده می‌شود و هیدروژن مصرف نشده به همراه نیتروژن و سایر ناخالصی‌ها دیگر به محیط تخلیه می‌شود. برای بالابردن کارایی و ایمنی لازم است تا حداقل هیدروژن ممکن به محیط تخلیه شود.

نسبت مقدار هیدروژن مصرف شده به هیدروژن ورودی به پیل سوختی درصد مصرف سوخت نامیده می‌شود [۴]. در پیل‌های سوختی پلیمری انتها بسته درصد مصرف سوخت تقریباً برابر ۱۰۰ درصد است. بدین معنا که تقریباً تمامی هیدروژن یا اکسیژن ورودی به پیل سوختی در واکنش الکتروشیمیایی شرکت می‌کنند [۵]. اگرچه در حالت انتها بسته احتمال دارد در قسمت‌های انتهایی پیل سوختی با کمبود سوخت مواجه شویم که نتیجه آن کاهش ولتاژ و عملکرد سلول می‌باشد [۶]. تجمع آب در قسمت انتهایی کانال‌های آند و

کاتد عامل اصلی کمبود سوخت هستند [۷]. اگر حجم آب در کاتد زیاد شود مقداری از آب از سمت کاتد به آند در اثر پدیده نفوذ معکوس انتقال می‌یابد. همچنین با انباشت گاز در سمت کاتد منافذ عبور گاز روی لایه نفوذ گاز از آب انباشته می‌شود و با محدودیت نفوذ گاز به سطح کاتالیست و محدودیت انجام واکنش مواجه خواهیم شد. این پدیده به غرقابگی معروف است [۸].

هو و همکاران [۹] پارامترهای دینامیکی مؤثر بر مصرف هیدروژن را در شرایط بار الکتریکی مختلف و پارامترهای تخلیه مختلف در یک پیل سوختی با آند انتها بسته که توسط گروه خود توسعه داده بودند، به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها مدل دینامیکی برای مصرف هیدروژن ارائه کردند که اثر تخلیه هیدروژن را در نظر می‌گیرد و سپس نتایجشان را با نتایج تست تجربی در چندین حالت عملیاتی مختلف اعتبارسنجی کردند.

چن و همکاران [۱۰] استراتژی تخلیه سمت آند را بر اساس تجمع نیتروژن در یک تک سلول پیل سوختی به صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند دوره زمانی برای باز کردن خروجی سلول در حالت انتها بسته با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که ولتاژ پیش‌بینی شده با مدل کالیبره شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی در شرایط جریان ثابت دارد.

بلودر و همکاران [۱۱] پدیده غرقابگی در یک پیل سوختی را با توجه به کاهش عملکرد بررسی کردند. آن‌ها فرایند تخلیه در سمت آند و زمان تخلیه را در ۵ نقطه توانی مختلف برای رسیدن سلول به سطح ولتاژ اولیه را آنالیز

و کاتد انتها بسته بررسی کردند. بررسی آن‌ها فقط به همین مورد محدود بود و تحقیقی روی پارامترهای تخلیه و عملکرد استک در حالت انتها بسته انجام ندادند.

در پژوهش پیش رو یک استک پیل سوختی ۲/۵ کیلووات طراحی، مونتاژ و تست شده است. هر دو سمت آند و کاتد در حالت انتها بسته قرار دارند و عملکرد حالت‌های انتها باز و انتها بسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای افزایش بهره‌وری سوخت سلول‌های آندی و کاتدی به دو بخش مجزا تقسیم شده و با این ایده اگرچه کل استک در حالت انتها بسته و با استوکیومتری یک کار می‌کند، اما بیش از ۸۵ درصد از سلول‌ها استوکیومتری بالاتر از یک داشته و در واقع شرایطی مشابه با حالت انتها باز دارند و فقط ۱۵ درصد از سلول‌ها استوکیومتری برابر با یک دارند. در واقع با توجه به اینکه دبی مورد نیاز کل استک ابتدا از مرحله یک می‌گذرد و سپس وارد مرحله دوم می‌شود استوکیومتری مرحله اول که بیش از ۸۵ درصد سل‌ها در آن قرار دارند بزرگ‌تر از یک می‌باشد. همچنین در یک حرکت خلاقانه سلول‌های تخلیه سمت آند و کاتد متفاوت از یکدیگر در نظر گرفته شدند تا یک سلول همزمان در حالت انتها بسته آند و کاتد قرار نگیرد. بر خلاف استک‌های ساخته شده در کارهای دیگر محققان، در این مقاله از مینیولدهای داخلی برای توزیع واکنش‌گرها به سلول‌ها استفاده شده است و با این کار حجم و وزن سیستم نسبت به پیل سوختی‌های مشابه به شدت کاهش یافته است. نوسانات ولتاژ در هنگام انتها بسته بودن آند، کاتد و همچنین حالتی که هر دو سمت با هم در حالت انتها بسته قرار دارند بررسی شده است.

۲- طراحی جدید استک

شکل ۱ طرح‌واره مورد استفاده برای استک پیل سوختی مورد نظر را نشان می‌دهد که شامل هیچ‌گونه دستگاه اضافه برای گردش مجدد اکسیژن و هیدروژن در مدار نیست. برای جداسازی آب از مخلوط گاز و آب خروجی از هر مرحله، از جداساز استفاده شده است. به عبارتی دیگر برای جلوگیری از غرقابگی، آب اضافی حمل شده توسط گاز خروجی از هر مرحله، قبل از ورود به مرحله‌ی بعد جدا می‌شود. همچنین در خروجی نیز یک جداساز در مدار قرار گرفته است تا آبی که به همراه گاز خروجی به بیرون منتقل می‌شود در آن جمع شده و موجب بستن راهگاه‌های خروجی نشود.

پیل سوختی ۲/۵ کیلووات ساخته شده به همراه دستگاه تست ساخته شده توسط تیم حاضر و کابل‌های مانیتور ولتاژ در شکل ۲ نشان داده شده است. تعداد کل سلول‌های استک ۱۴ عدد می‌باشد که ۱۲ سلول در مرحله اول و ۲ سلول در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. مرحله اول و دوم اکسیژن به ترتیب شامل ۱۲ سلول دوم و ۲ سلول اول می‌باشند. برای هیدروژن ۱۲ سلول اول در مرحله اول و ۲ سلول دوم در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. با این تقسیم‌بندی مراحل، هیچ‌کدام از سلول‌های تخلیه همزمان در حالت انتها بسته آند و کاتد قرار نمی‌گیرند. به این دلیل که استوکیومتری مرحله اول برابر ۱/۱۷ و استوکیومتری مرحله دوم برابر یک می‌باشد. یعنی سلول‌های

کردند و طی آن یک منطق برنامه‌نویسی تخلیه جدید را بر اساس متغیرهای مؤثر بر غرقابگی تست کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با استفاده از این منطق جدید کارایی سلول به شدت افزایش می‌یابد.

وانگ [۱۲] تأثیر روش‌های تغذیه مختلف هیدروژن به سلول را بر کارایی سیستم پیل سوختی بررسی کرد و کارایی الکتروشیمیایی پیل را در حالت انتها باز با استفاده از نرم‌افزار تجاری مرجع در حالت‌های تغذیه هیدروژن مختلف محاسبه کرد.

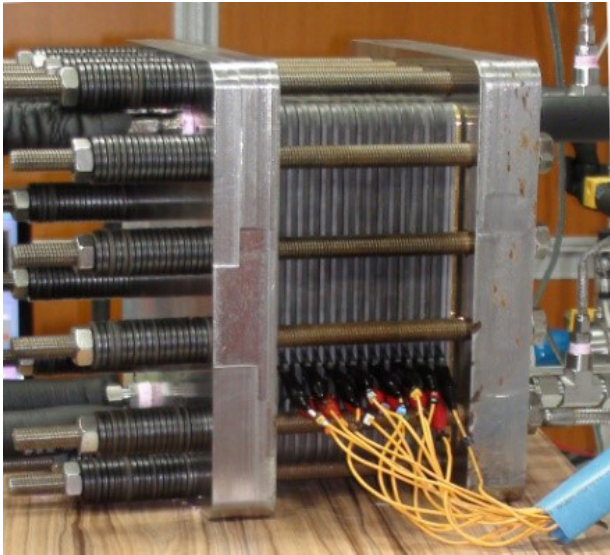
او از سیستم تست خانگی و استراتژی کنترل هوشمند برای تست کارایی پیل سوختی در حالت‌های انتها بسته و انتها باز استفاده کرد. طبق نتایج، اندازه‌گیری گذرای جریان سیال و خصوصیات الکتروشیمیایی به هنگام تخلیه ولتاژ، سلول را در حالت انتها بسته جریان ثابت پایدار نگه می‌دارد. او گزارش کرد برای توان‌های کمتر از ۱ کیلووات هر دو حالت انتها بسته و گردش مجدد بازدهی مشابه دارند.

یانگ و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای عملکردی همانند میزان رطوبت، فشار هیدروژن و چگالی جریان را به صورت تجربی بر عملکرد یک پیل سوختی با آند انتها بسته بررسی کردند. معیار تخلیه در سمت آن کاهش ۰/۱ ولتی در ولتاژ سلول بوده است و مدت زمان متوسط بین ۲ تخلیه متوالی به عنوان دوره زمانی تخلیه در نظر گرفته شده است. در این پژوهش چگالی جریان موضعی برای مطالعه تأثیر محلی پارامترها اندازه گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد مدت زمان بین دو تخلیه متوالی با افزایش رطوبت ورودی کاتد و افزایش چگالی جریان کاهش یافته و با افزایش فشار هیدروژن و استوکیومتری هوای سمت کاتد افزایش می‌یابد.

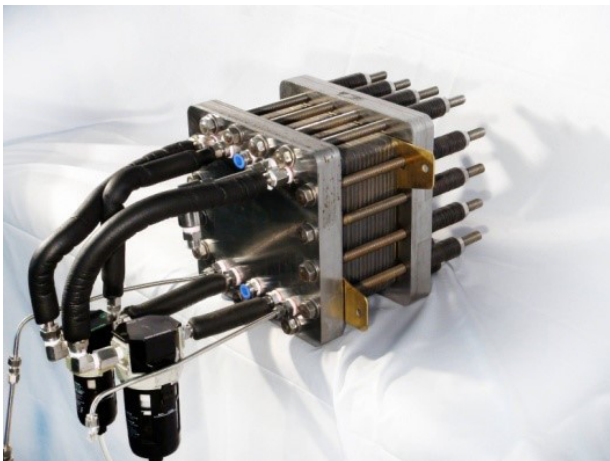
جانگ و همکاران [۱۴] عملکرد دینامیکی یک استک کلاس توان کیلووات ۴۰ سلول با آند انتها بسته را به صورت تجربی بررسی کردند. برای افزایش مصرف هیدروژن و کاهش آب‌گرفتگی در استک، از باز و بسته کردن شیر سولونوییدی خروجی استفاده کردند. آن‌ها در نتایج خود ذکر کردند که دفعات باز و بسته شدن شیر سولونوییدی در توان‌های بالا زیاد و در توان‌های پایین برای ذخیره هیدروژن کم است. آن‌ها زمان‌های بهینه تخلیه را برای مدیریت مناسب آب و افزایش عملکرد گزارش کردند.

اینسوهان و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۳ طرح جدیدی را در یک استک ۱۵ کیلووات هیدروژن- هوا با آند انتها بسته برای افزایش بهره‌وری سوخت ارائه دادند. آن‌ها از طرح مینیولده خارجی برای تغذیه واکنش‌گرها استفاده کردند و با مجزا کردن استک به چند قسمت مجزا، استوکیومتری سوخت را در اکثر سلول‌ها بالا نگه داشتند. اینسوهان و همکاران [۱۶] همچنین در سال ۲۰۱۶ یک استک پیل سوختی هیدروژن- اکسیژن با آند و کاتد انتها بسته را برای کاربری زیردریا طراحی و تست کردند. ویژگی‌های طرح جدید این گروه همانند مقاله قبلی بود و فقط به علت کاربری زیر سطحی به جای هوا از اکسیژن استفاده کردند.

علیزاده و همکاران [۱۷] با طراحی یک استک کوتاه ۴ سلول، افت‌های ولتاژ مختلف را با روش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حالت آند



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 2. a) Cables of monitoring voltage b) Manufactured 14 cells PEMFC stack c) Manufactured test station with PEMFC stack in testing

شکل ۲: الف) کابل‌های مانیتور ولتاژ ب) استک ۱۴ سلول ساخته شده دستگاه تست ساخته شده به همراه استک در حال تست

مرحله اول اکسیژن و هیدروژن که تقریباً بیش از ۸۵ درصد از سلول‌ها را شامل می‌شود، دارای استوکیومتری بالاتر از یک هستند و مشکل غرقابگی حتی با انتها بسته بودن استک برای آن‌ها به وجود نخواهد آمد.

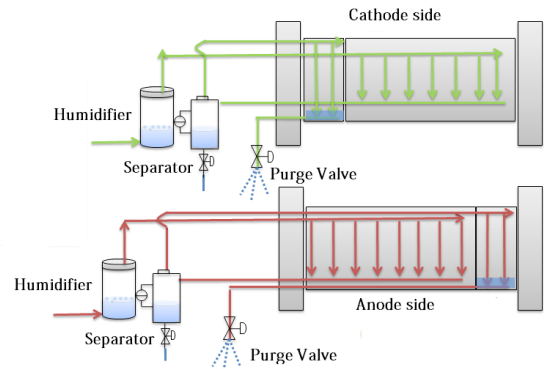


Fig. 1. Schematic design of PEMFC stack

شکل ۱: طرح‌واره استک پیل سوختی طراحی شده

۳- فعال‌سازی غشاء

فرآیند آمادگی غشاء همواره برای فعال‌سازی پیل‌های سوختی غشاء پلیمری تازه ساخت ضروری است. این فرآیند به نام رام کردن نیز نامیده می‌شود، که شامل یک دوره رشد نهفته جهت فعال‌سازی و رسیدن به بیشینه کارایی می‌باشد. در طول این دوره فعال‌سازی، کارایی غشاء طبیعتاً به تدریج افزایش یافته تا به نقطه یکنواخت و صاف بدون رشد می‌رسد. بسته به نحوه مونتاژ غشاء الکتروود این فرآیند ممکن است از ساعت‌ها تا روزها زمان ببرد. با توجه به مصرف سوخت هیدروژن و افزایش هزینه فرآیند، شتاب دادن این فرآیند در زمان بهینه با ارزش خواهد بود. در این مقاله غشاء مورد نظر که از شرکت پکسی‌تک خریداری شده بود مطابق با شرایط شرکت سازنده فعال‌سازی شد. روند فعال‌سازی به این صورت بود که با تنظیم ولتاژ سلول در مقدار ۰/۶ ولت تغییرات جریان را رصد می‌کنیم و زمانی که تغییرات جریان به صفر میل کرد عملیات فعال‌سازی کامل است. در جدول ۱ شرایط مربوط به فعال‌سازی شرکت سازنده آمده است.

جدول ۱: شرایط مربوط به فعال‌سازی

Table 1. Activation condition according to manufacture company

دما (°C)	فشار (bar)	استوکیومتری	دبی (lpm)
خشک	۲	۱/۲	۳۹
۵۳	۲	۱/۵	۲۴

همچنین نمودار فعال‌سازی مربوط به تست حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنان که از نمودار مشخص است، ۲ ساعت پس از شروع فرآیند فعال‌سازی تغییرات جریان با زمان به صفر رسیده که نمایان‌گر کامل شدن فرآیند فعال‌سازی می‌باشد. به عبارتی به هنگام فعال‌سازی مطابق با ضوابط شرکت سازنده، ولتاژ متوسط هر سل را در مقدار ۰/۶ ولت تنظیم

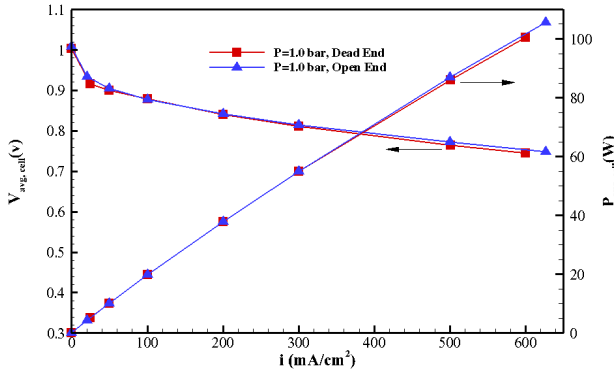


Fig. 5. Polarization curve at dead-end and open-end mode ($T=70^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{ barg}$)

شکل ۵: منحنی‌های قطبیت حالت‌های انتها باز و انتها بسته در دمای 70°C و فشار نسبی ۱ بار

تخلیه و نیاز به مدت زمان تخلیه بیشتر برای خروج ناخالصی‌ها می‌باشد. در تمامی تست‌ها رطوبت ورودی بالای ۸۰ درصد و انرژی مه‌ساز ۹/۵ نیوتون متر، استوکیومتری در حالت انتها باز برای هیدروژن ۱/۲ و برای اکسیژن ۱/۵ و میزان تخلیه در حالت انتها بسته برای هیدروژن ۰/۳ درصد و برای اکسیژن یک درصد در نظر گرفته شده است.

در شکل ۶ تغییرات ولتاژ و توان با جریان و چگالی جریان به تصویر کشیده شده است. استوکیومتری استک برابر با یک و رطوبت هیدروژن و اکسیژن در ورودی استک بیش از ۸۰ درصد است. این استک قادر است که به توان ۲/۵ کیلووات در چگالی جریان 1200 mA/cm^2 برسد در حالی که ولتاژ تمامی سلول‌ها بزرگ‌تر از ۰/۶ ولت است. این موضوع بدین معناست که این استک قادر است که توان را به بیش از ۳ کیلووات افزایش دهد بدون این که به ولتاژ محدود کننده ۰/۴ ولت برسد. همچنین مقادیر چگالی جریان نیز در محور افقی بالایی نشان داده شده است. چگالی جریان نهایی مورد بررسی ولتاژ کماکان در محدوده‌ی افت اهمی می‌باشد و طرح مورد نظر توانسته است از ایجاد افت غلظتی جلوگیری کند. به عبارتی واکنش‌گرها می‌توانند با سرعتی بالاتر از سرعت مصرف به سطح کاتالیست برسند.

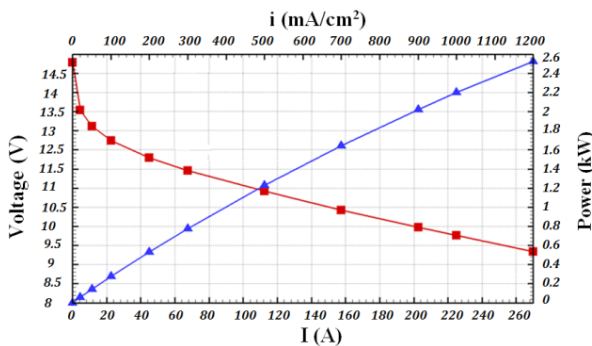


Fig. 6. Diagram of power and voltage with current and current density at dead-end mode at $T=70^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{ barg}$

شکل ۶: نمودار توان و ولتاژ بر حسب جریان و چگالی جریان در حالت انتها بسته در دمای 70°C و فشار نسبی ۱ بار

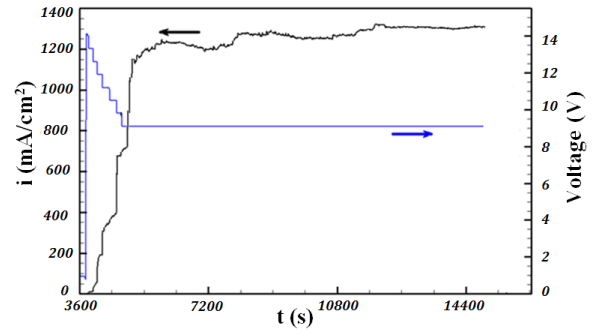


Fig. 3. Current density diagram in activation process

شکل ۳: نمودار چگالی جریان فرآیند فعال‌سازی غشاء

نموده و تا زمانی که به علت فعال شدن سایت‌های واکنش، جریان در حال افزایش است، فرآیند ادامه پیدا می‌کند.

۴- نتایج تست تجربی

پس از گذشت چند روز از روند پیش‌فعال‌سازی، منحنی قطبیت به دست آمده و اثر زمان تخلیه بررسی شده است. سلول‌های شماره‌ی ۱۳ و ۱۴ برای تخلیه هیدروژن است. به منظور جلوگیری از کاهش شدید ولتاژ، سلول‌های تخلیه‌ی هیدروژن و اکسیژن یکسان نیستند و سلول‌های شماره‌ی ۱ و ۲ به عنوان سلول تخلیه‌ی اکسیژن در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۴ تغییرات چگالی جریان در طول تست‌های مختلف نمایش داده شده است که شامل موارد زیر است:

(۱) پیش‌فعال‌سازی، (۲) آزمون منحنی قطبیت در حالت انتها باز، (۳) حالت انتظار (۴) آزمون منحنی قطبیت در حالت انتها بسته.

در شکل ۵، نتایج حاصل از حالت‌های انتها باز و بسته با هم مقایسه می‌شوند. نتایج بیان‌گر عملکرد مشابه حالت‌های انتها باز و بسته می‌باشد. با افزایش چگالی جریان، اختلاف بین نمودارهای حالت انتها باز و انتها بسته مشهود می‌شود که ناشی از افزایش آب تولیدی و تجمع آن در سلول‌های

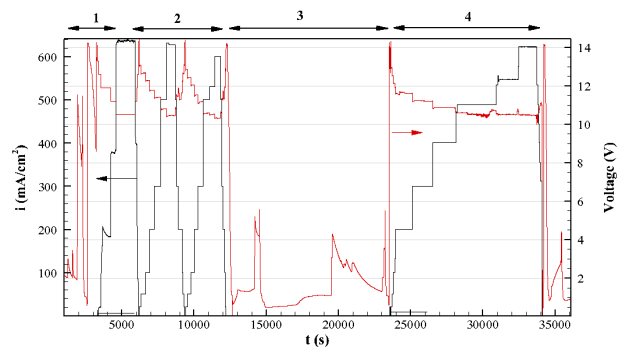


Fig. 4. Variation of voltage and current with time ($T=70^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{ barg}$) (1- preconditioning 2- Open-end mode 3- waiting time 4- dead-end mode)

شکل ۴: تغییرات ولتاژ و جریان با زمان در دمای 70°C و فشار بخار نسبی ۱ بار ((۱) پیش‌فعال‌سازی، (۲) حالت انتها باز، (۳) زمان انتظار (۴) حالت انتها بسته)

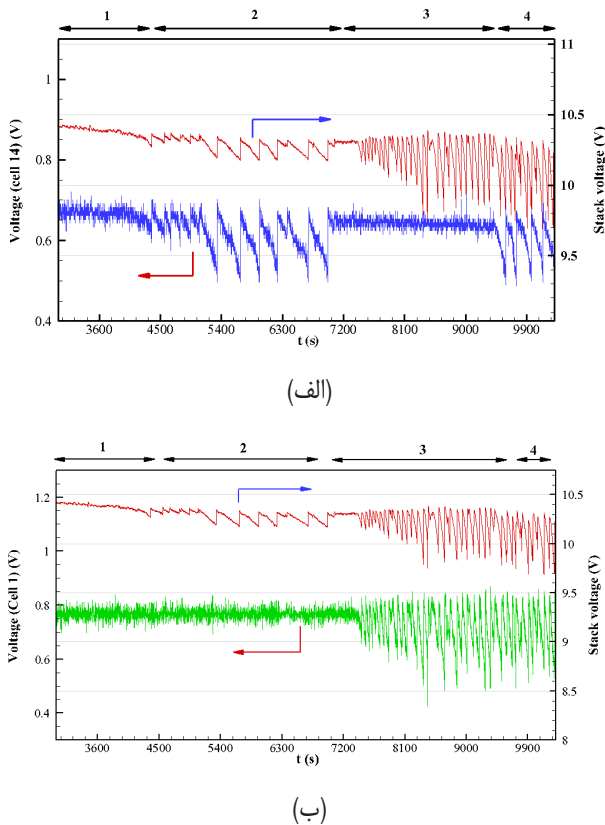


Fig. 7. Variation of stack voltage and purge cells voltage with time a) cathode b) anode at $T=70^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{bar}$

شکل ۷: تغییرات ولتاژ استک و سلول‌های تخلیه (الف) کاتد، (ب) آند با زمان در حالت انتها بسته در دمای 70°C و فشار نسبی ۱ بار

شکل ۸ (ب) نشان داده شده است. در این جا نیز نتایج مشابهی دیده شود اما نوسانات ولتاژ در سمت اکسیژن بزرگ‌تر از سمت هیدروژن است. این اثر به تشکیل و انباشت بیشتر آب در سمت کاتد و تجمع ناخالصی در سلول‌های تخلیه با توجه به واکنش تشکیل آب مربوط است. لذا تخلیه در تعداد بازه‌های زمانی بیشتری صورت گرفته تا بتواند آب بیشتری را از سیستم خارج کند. هر دو سلول تخلیه‌ی کاتدی رفتار مشابهی را نشان می‌دهند که این موضوع نشان‌گر وجود جریان یکنواخت گاز بین سلول‌ها با زمان است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شیر سوزنی قبل از شیر تخلیه سولونوییدی خروجی به خوبی توانسته است نوسانات فشار به هنگام تخلیه را مهار و از اعمال شوک به استک و غشاء پیل سوختی که گاهی موجب پارگی آن می‌شود جلوگیری کند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک استک پیل سوختی ۲/۵ کیلووات غشاء تبادل پروتون پلیمری طراحی و ساخته شده است و سپس مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای افزایش بهره‌وری، سوخت سلول‌های آندی و کاتدی به دو بخش مجزا تقسیم شده و با این کار اگرچه کل استک در حالت انتها بسته و با استوکیومتری یک کار می‌کند، اما بیش از ۸۵ درصد از سلول‌ها استوکیومتری

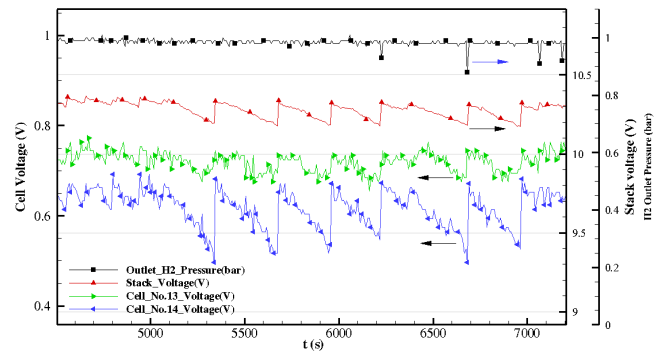
در این مقاله دو روش برای تخلیه در نظر گرفته شده است: (۱) مبنای زمانی و (۲) مبنای ولتاژی. تغییرات در ولتاژ استک و سلول‌های تخلیه در روش‌های تخلیه‌ی متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است. این ۴ قسمت به ترتیب نمایانگر: (۱) تخلیه بر مبنای زمان در هر دو سوی آند و کاتد است، (۲) تخلیه بر مبنای ولتاژ در سمت آند است، (۳) تخلیه بر مبنای ولتاژ در سمت کاتد است، (۴) تخلیه بر مبنای ولتاژ در هر دو سمت آند و کاتد است. سلول‌های ۱۳ و ۱۴، سلول‌های تخلیه‌ی سمت آند و سلول‌های ۱ و ۲، سلول‌های تخلیه سمت کاتد است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با باز و بسته شدن شیرهای تخلیه، ولتاژ سلول افزایش و کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که ولتاژ استک نسبت به تخلیه در سمت کاتد حساس‌تر بوده و نوسانات شدیدتری دارد. البته این مسأله با توجه به این که واکنش تشکیل آب در سمت کاتد اتفاق می‌افتد و تجمع آب تولیدی در این قسمت بیشتر است محتمل به نظر می‌آید. تخلیه بر مبنای زمان در چگالی جریان‌های پایین روشی مناسب به نظر می‌آید زیرا میزان آب تولیدی پایین بوده و ولتاژ سلول به سرعت کاهش نخواهد یافت. البته در حالت مبنای زمانی، بازه‌های زمانی متفاوت باید مورد ارزیابی قرار گیرند تا بهترین بازه‌ی زمانی برای بسته بودن و باز بودن شیر تخلیه‌ی سولونوییدی به دست آید. برای اینکه نوسانات شدید فشار به هنگام تخلیه به استک وارد نشود، قبل از شیر تخلیه از یک شیر سوزنی استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین زمان برای باز و بسته کردن شیر تخلیه معادل با ۲ و ۴ ثانیه برای سلول‌های کاتدیک و ۲ و ۶ ثانیه برای سلول‌های آندیک است.

نوسانات ولتاژ و فشار در سلول‌های تخلیه‌ی هیدروژن در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد در چگالی جریان‌های پایین که اثر طغیان قابل صرف نظر است، روش بر مبنای زمان می‌تواند به کار رود در حالی که روش بر پایه‌ی ولتاژ زمانی که چگالی جریان زیاد باشد باید استفاده شود. نتایج این پژوهش نشان‌گر این است که با استفاده از طرح ارائه شده، امکان بستن شیر خروجی سولونوییدی بدون کاهش قابل توجه در ولتاژ خروجی سلول‌ها وجود دارد. این ملاک برای تخلیه به صورت ۰/۰۵ ولت کاهش در سلول‌های تخلیه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است با وجود انتها بسته بودن کل استک تنها سلول‌های پرچ تحت تأثیر تجمع آب و ناخالصی‌ها قرار گرفته و کاهش ولتاژ در آن‌ها مشاهده می‌شود و سطح ولتاژ میانگین بزرگ‌تر بوده و از پایداری مناسب‌تری برخوردار است. این امر از طریق بالا بردن مقدار استوکیومتری در مرحله‌ی اول حاصل شده است. علت تفاوت ولتاژ در دو سلول تخلیه را باید در توزیع واکنش‌گر جستجو کرد. در واقع با طراحی مناسب مینیولدهای واکنش‌گرها می‌توان توزیع یکنواختی از واکنش‌گرها در سلول‌ها ایجاد کرد. نوسانات ولتاژ در سلول‌های تخلیه علاوه بر خروج آب تجمع یافته و ناخالصی‌ها به نوسانات فشار در مرحله‌ی دوم نیز مربوط است که در اثر باز شدن دوره‌ای شیر تخلیه ایجاد می‌شود.

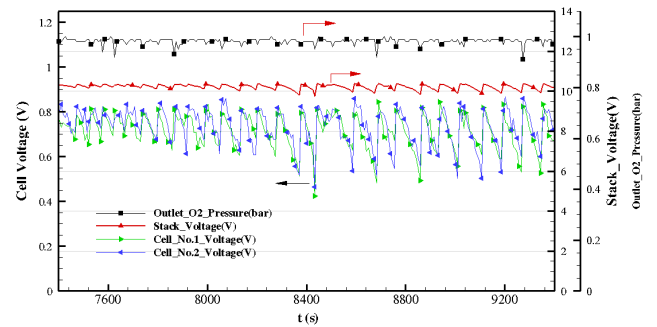
نوسانات ولتاژ در سلول‌های تخلیه‌ی اکسیژن و ولتاژ کلی استک در

منابع

- [1] Z. Wan, J. Wan, J. Liu, Z. Tu, M. Pan, Z. Liu, W. Liu, Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack, *Applied Thermal Engineering*, 42 (2012) 173-178.
- [2] K. Li, G. Ye, J. Pan, H. Zhang, M. Pan, Self-assembled Nafion®/metal oxide nanoparticles hybrid proton exchange membranes, *Journal of Membrane Science*, 347(1-2) (2010) 26-31.
- [3] S.-D. Oh, K.-Y. Kim, S.-B. Oh, H.-Y. Kwak, Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications, *Applied Energy*, 95 (2012) 93-101.
- [4] W.R. Baumgartner, P. Parz, S. Fraser, E. Wallnöfer, V. Hacker, Polarization study of a PEMFC with four reference electrodes at hydrogen starvation conditions, *Journal of Power Sources*, 182(2) (2008) 413-421.
- [5] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation, *Journal of Power Sources*, 194(1) (2009) 130-145.
- [6] S. Zhang, X. Yuan, H. Wang, W. Mérida, H. Zhu, J. Shen, S. Wu, J. Zhang, A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, *International journal of hydrogen energy*, 34(1) (2009) 388-404.
- [7] D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, B. Yi, Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation, *Journal of Power Sources*, 194(2) (2009) 847-853.
- [8] H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 178(1) (2008) 103-117.
- [9] Y. Hou, C. Shen, D. Hao, Y. Liu, H. Wang, A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation, *Renewable Energy*, 62 (2014) 672-678.
- [10] Y.-S. Chen, C.-W. Yang, J.-Y. Lee, Implementation and evaluation for anode purging of a fuel cell based on nitrogen concentration, *Applied Energy*, 113 (2014) 1519-1524.
- [11] B. Belvedere, M. Bianchi, A. Borghetti, A. De Pascale, M. Paolone, R. Vecchi, Experimental analysis of a PEM fuel cell performance at variable load with anodic exhaust management optimization, *international journal of hydrogen energy*, 38(1) (2013) 385-393.
- [12] J.-J. Hwang, Effect of hydrogen delivery schemes



(الف)



(ب)

Fig. 8. Variation of stack voltage, hydrogen purge cells voltage and hydrogen output pressure at voltage base purge at $T=70^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{bar}$

شکل ۸: تغییرات ولتاژ استک و سلول‌های تخلیه‌ی هیدروژن و فشار خروجی هیدروژن در فرایند تخلیه بر مبنای ولتاژ در دمای 70°C و فشار نسبی ۱ بار

بالتر از یک داشته و در واقع شرایطی مشابه با حالت انتها باز دارند و فقط ۱۵ درصد از سلول‌ها استوکیومتری برابر با یک دارند. در واقع با توجه به اینکه دبی مورد نیاز کل استک ابتدا از مرحله یک می‌گذرد و سپس وارد مرحله دوم می‌شود استوکیومتری مرحله اول که بیش از ۸۵ درصد سل‌ها در آن قرار دارند بزرگ‌تر از یک می‌باشد. همچنین در یک حرکت خلاقانه سلول‌های تخلیه سمت آند و کاتد متفاوت از یکدیگر در نظر گرفته شدند تا یک سلول همزمان در حالت انتها بسته آند و کاتد قرار نگیرد. با این ایده حالت انتها بسته عملکرد مشابهی را نسبت به سیستم انتها باز نشان داد. در این پژوهش برای اولین بار در استک‌های مرحله‌ای از مینیولدهای داخلی استفاده شد و با این طراحی وزن و حجم سیستم به شدت کاهش یافت. علاوه بر این، نوسانات ولتاژ در سلول‌های تخلیه‌ی کاتدی بزرگ‌تر از سلول‌های آندی است. این پدیده به تشکیل و انباشت بیشتر آب در سمت کاتد مربوط می‌باشد. لذا تخلیه در تعداد بازه‌های زمانی بیشتری صورت گرفته تا بتواند آب و ناخالصی بیشتری از سیستم خارج کند. اثر زمان تخلیه بر عملکرد استک ارزیابی گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین زمان برای باز و بسته کردن شیر تخلیه معادل با ۲ و ۴ ثانیه برای سلول‌های کاتدیک و ۲ و ۶ ثانیه برای سلول‌های آندی است.

- Journal of Hydrogen Energy*, 38(27) (2013) 11996-12006.
- [16] I.-S. Han, B.-K. Kho, S. Cho, Development of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack for an underwater vehicle, *Journal of Power Sources*, 304 (2016) 244-254.
- [17] E. Alizadeh, M. Khorshidian, S.M. Rahgoshay, M. Saadat, S. Hossein, M. Rahimi-Esbo, Electrochemical impedance spectroscopy for investigation of different losses in 4-cells short stack with integrated humidifier and water separator, *Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell*, 3(2) (2016) 127-136.
- on fuel cell efficiency, *Journal of Power Sources*, 239 (2013) 54-63.
- [13] Y. Yang, X. Zhang, L. Guo, H. Liu, Overall and local effects of operating conditions in PEM fuel cells with dead-ended anode, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7) (2017) 4690-4698.
- [14] J.-H. Jang, W.-M. Yan, H.-C. Chiu, J.-Y. Lui, Dynamic cell performance of kW-grade proton exchange membrane fuel cell stack with dead-ended anode, *Applied Energy*, 142 (2015) 108-114.
- [15] I.-S. Han, J. Jeong, H.K. Shin, PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization, *International*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

E. Alizadeh, M. Khorshidian, S. H. M. Saadat, S. M. Rahgoshay, M. Rahimi-Esbo, Experimental Study of the New Design 2.5kW Dead-End H₂/O₂ PEM Fuel Cell Stack with New Design to Improve Fuel Utilization, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 369-376.

Eng., 50(2) (2018) 369-376.

DOI: 10.22060/mej.2017.12067.5271



