

مدلسازی و شبیه سازی دینامیکی سیستم پیل سوختی جهت کاربردهای تولید پراکنده

نیما فرخزاد ارشاد، سید علی پورموسوی کانی.

دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی قدرت، آزمایشگاه انرژیهای تجدیدپذیر.

E-mail: nimafe@aut.ac.ir, ali_pourmousavi@aut.ac.ir

چکیده - در این مقاله مدل دینامیکی جامع سیستم پیل سوختی از نوع PEM با ذخیره ساز هیدروژن جهت کاربردهای تولید پراکنده ارائه شده است. با شبیه سازیهای صورت گرفته، امکان سنجی فنی استفاده از مولد پیل سوختی جهت استفاده در مصارف خانگی مورد بررسی قرار گرفته است. در مدلسازی صورت گرفته برای پیل سوختی، اثرات تغییرات دما و اثر خازنی لایه دوگان لحاظ شده است. از یک اینورتر ۴ پالسه تکفاز برای تبدیل ولتاژ DC خروجی سیستم به AC استفاده گردید. همچنین، کنترلر PID برای کنترل دبی جرمی هیدروژن و اکسیژن ورودی پیل سوختی، جهت بهبود پاسخ حالت گذرا و ماندگار ولتاژ خروجی در پاسخ به اغتشاشات اعمالی به بار به کار گرفته شده است. برای تثبیت ولتاژ پیل سوختی از ابرخازن بهره گرفته شده است. شبیه سازیها در محیط MATLAB/SIMULINK صورت گرفته است. بررسی نتایج نشان می دهد که تعقیب بار و تثبیت ولتاژ به نحو مطلوبی صورت گرفته است. سیستم پیشنهادی از یک الکترولایزر جهت تولید هیدروژن استفاده می کند و با ذخیره هیدروژن تولیدی نیازی به استفاده از باتری برای ذخیره سازی ندارد. بنابراین در کاربردهای دور از شبکه مناسب می باشد.

کلید واژه- الکترولایزر، تولید پراکنده، پیل سوختی، ابرخازن، سیستم مجزا از شبکه، SIMULINK.

۱- مقدمه

احتراقی، میکروتوربینها، پیلهای سوختی، دیزل ژنراتورها، توربینهای بادی، سلولهای خورشیدی و ... اشاره نمود.

پیلهای سوختی ابزارهایی هستند که انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی و گرما تبدیل می نمایند. امروزه پیلهای سوختی پس از گسترش تکنولوژی ساخت، کاربردهای بسیار وسیعی در صنایع مختلف از جمله میکروالکترونیک، خودروهای الکتریکی، کشتیهای کوچک، هواپیماهای جاسوسی، اتوبوسها، مصارف خانگی و تجاری، CHP (Combined Heat and Power) و ... یافته اند. طرح اولیه پیل سوختی توسط William Grove در سال ۱۸۳۹ ارائه شد اما نخستین نمونه عملی پیل سوختی توسط سازمان تحقیقات فضایی آمریکا (ناسا) در سال ۱۹۵۵ با ظرفیت ۵ کیلووات ساخته شد. بی صدا بودن و نداشتن هیچ گونه نویزی سبب توسعه پیل سوختی در کاربردهای نظامی

با توجه به گسترش مصرف انرژی و گرایش جهانی به تولید انرژی به صورت غیرمتمرکز در محل مصرف، ابزارهای مختلف تولید پراکنده و ساخت نمونههای تجاری-صنعتی آنها جایگاه ویژه ای یافته است. در واقع منابع تولید پراکنده، منابع تولید توان الکتریکی هستند که مستقیماً به شبکه توزیع یا به مصرف کننده متصل اند. سطح ولتاژ منابع تولید پراکنده از ۴۰۰ ولت تا حداکثر ۳۳ کیلوولت بوده و ظرفیت آنها در محدوده چند وات تا حداکثر ۱۰۰ مگاوات قرار می گیرد. [۱و۲]

ابزارهای بسیار متنوعی مبتنی بر انرژیهای فسیلی و تجدیدپذیر و ابزارهای ذخیره سازی انرژی برای تولید پراکنده وجود دارند که در این میان می توان به موتورهای

بار را از شبکه سراسری حذف کنند. لذا این راهبرد منجر به هموار شدن منحنی بار روزانه شبکه سراسری خواهد شد.

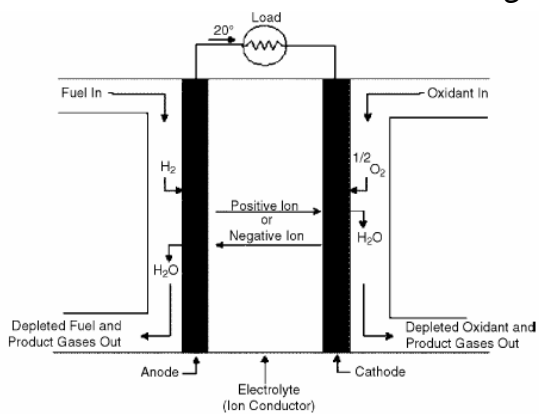
۲- مشخصات کلی سیستم

در سیستم پیشنهادی از ۶۵ عدد پیل سوختی نوع PEMFC، الکترولایزر (stuartenergy)، مبدل توان DC/DC، مبدل توان DC/AC، ابرخازن و چند کنترلر استفاده شده است. سیستم پیل سوختی شامل ۶۵ عدد پیل سوختی مجزا است که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. جریان خروجی پیل سوختی می‌تواند بین ۰ تا ۲۵ آمپر تغییر کند. دبی جرمی اکسیژن و هیدروژن ورودی به پیل سوختی توسط کنترلرهای PID به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که ولتاژ خروجی مجموعه پیل سوختی در مقدار ۴۸ ولت تثبیت شود.

۳- مدل دینامیکی اجزاء سیستم

۳-۱- مدل پیل سوختی

پیل سوختی مدل‌سازی شده در این مقاله از نوع PEMFC است که دارای دمای کاری حدود ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. ساختار ساده یک پیل سوختی شامل یک لایه الکترولیت در تماس با یک آند و کاتد متخلخل در هر طرف می‌باشد. نمایش شماتیک یک پیل سوختی با گازهای واکنشی/تولیدی و هدایت یون‌ها از میان سلول در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک پیل سوختی.

شده است. همچنین از این ابزار در سفینه های فضایی جهت تولید آب مورد نیاز سرنشینان نیز استفاده می‌شود. [۲۱]

از جمله مزایای پیل سوختی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- راندمان بالا: از دیدگاه انرژی هنگام تولید الکتریسیته راندمانی بین ۴۰ تا ۶۰ درصد دارند. در تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، این راندمان تا مقدار ۸۵ درصد نیز افزایش می‌یابد.

ب- تنظیم راحت از دیدگاه کنترل توان: با کنترل میزان مواد واکنش دهنده (هیدروژن و اکسیژن) می‌توان توان خروجی پیل سوختی را کنترل کرد.

ج- سازگاری با محیط زیست: خروجی آن تنها آب بوده و با توجه به عدم حضور قسمت‌های مکانیکی، هیچگونه آلودگی صوتی ندارند.

د- انعطاف پذیری سوخت: می‌توان هیدروژن را از منابع گوناگونی مانند آب، گاز طبیعی، ذغالسنگ، متانول، سوخت‌های هیدروکربنی تهیه کرد.

ه- قابل حمل و سبک بودن.

پیل‌های سوختی بر حسب نوع الکترولیت مورد استفاده، به ۵ گروه مختلف تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)، ۲- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)، ۳- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)، ۴- پیل سوختی قلبیایی (AFC)، ۵- پیل سوختی پلیمری (PEMFC).

با توجه به اینکه سیستم پیل سوختی مورد نظر این مقاله جهت پیک زدایی منحنی تقاضا در بخش خانگی طراحی شده است، لذا مناسب‌ترین گزینه از دیدگاه توان تولیدی، نوع پیل سوختی PEM می‌باشد. برای تامین سوخت مصرفی پیل سوختی، از یک دستگاه الکترولایزر استفاده می‌کنیم. استراتژی مورد نظر در استفاده از الکترولایزر بدینگونه است که در ساعات نیمه شب با توجه به کم بودن تقاضای بار، انرژی الکتریکی شبکه سراسری به دستگاه الکترولایزر تغذیه شده تا هیدروژن مورد نیاز برای عملکرد پیل سوختی در ساعات اوج مصرف تولید و در تانک هیدروژن ذخیره گردد. با این استراتژی، هر یک از مصرف کنندگان در بخش خانگی می‌توانند بخشی از بار مورد نیاز خود را در ساعات اوج مصرف تولید کرده و بخشی از پیک

$$R_a = -\frac{\eta_{act}}{i} \quad (5)$$

اثرات همزمان ترمودینامیکی، انتقال جرم، انرژی جنبشی و مقاومت اهمی، مقدار ولتاژ خروجی از پیل سوختی را تعیین می‌کنند که به صورت زیر می‌باشد:

$$V = E - v_{act} + \eta_{ohmic} \quad (6)$$

مدل حالت پایدار پیل سوختی که در معادلات بالا به آن اشاره شد، نشان می‌دهد که جریان پیوسته، دمای سلول، فشار هیدروژن و فشار اکسیژن بر مقدار ولتاژ خروجی سلول اثرگذار خواهند بود. افت ولتاژ در پیل سوختی به وسیله افزایش فشار سلول جبران می‌شود. رفتار دینامیکی ولتاژ پیل سوختی می‌تواند به وسیله اضافه کردن یک خازن به مدل حالت پایدار شبیه سازی شود. اثر لایه دوگانه بار الکتریکی، به وسیله یک خازن که به صورت موازی با مقاومت قرار گرفته، مدلسازی می‌شود. معادله دیفرانسیل توصیف کننده ولتاژ پیل سوختی برابر است با:

$$\frac{dv_{act}}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{v_{act}}{R_a \times C} \quad (7)$$

تلفات ولتاژ اهمی در پیل سوختی برابر است با:

$$\eta_{ohmic} = -i \times R_{in} \quad (8)$$

سیستم پیل سوختی در این مطالعه متشکل از ۶۵ سلول است که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. بنابراین ولتاژ کل بسته برابر خواهد بود با:

$$V_{stack} = 130V_{cell} \quad (9)$$

مقدار هیدروژن و اکسیژن مصرفی در پیل سوختی بستگی به نرخ شار ورودی و خروجی و جریان الکتریکی خروجی از پیل سوختی دارد. این مسئله نیز بستگی به حجم الکترودها دارد. اگر نرخ‌های شار ورودی و خروجی برحسب مول بر ثانیه مشخص باشند، سپس فشار گاز داخل رطوبت ساز پیل سوختی را می‌توان با استفاده از اصل تساوی مول‌ها به دست آورد. برای آند پیل سوختی، می‌توان نوشت:

$$\frac{V_a}{RT} \cdot \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2 in} - (\rho_{H_2} \cdot UA)_{out} - \frac{i}{2F} \quad (10)$$

در یک پیل سوختی معمولی، سوخت‌های گازی به طور پیوسته به آند تغذیه شده و ماده اکسید کننده (اکسیژن هوا) به طور پیوسته به کاتد تزریق می‌گردد. واکنش‌های شیمیایی با حضور کاتالیست در الکترودها رخ داده و یک جریان الکتریکی در مدار خارجی تولید خواهد شد. رویکردهای مختلفی برای مدلسازی PEMFC وجود دارد [۸].

مدل پارامتری پیل سوختی PEM توسط Amphlett با استفاده از یک روش مکانیکی و تعدادی از پارامترهای گروهی مدلسازی شده که در اینجا از این مدل استفاده خواهد شد. [۹] پتانسیل استاندارد ایده‌آل (پتانسیل Nernst) یک فیول سل H₂/O₂ را با E₀ نشان داده و برابر ۱,۲۲۹ ولت با تولید آب می‌باشد. پتانسیل واقعی سلول از پتانسیل مرجع آن کمتر است زیرا که تلفات بازگشت‌ناپذیری در سیستم وجود دارد. تمامی روابط در این بخش از مراجع [۵] و [۹] استخراج شده‌اند. پتانسیل ترمودینامیکی E از طریق معادله توسعه یافته Nernst به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \times T \times (\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (1)$$

که در این معادله، P برابر فشار موثر برحسب اتمسفر و T برابر دما در واحد کلوین است. غلظت اکسیژن حل نشده در واسط گازی/مایع می‌تواند به وسیله قانون هانری به صورت زیر محاسبه شود:

$$c_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{498}{T}\right)} \quad (2)$$

معادله پارامتری برای اضافه ولتاژ ناشی از فعالیت و مقاومت داخلی که از طریق آنالیزهای تجربی به دست آمده، برابر است با:

$$\eta_{act} = -0.9514 + 0.00312T - 0.000187T \times \ln(i) + 7.4 \times 10^{-5} T \times \ln(c_{O_2}) \quad (3)$$

$$R_{in} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} T + 8 \times 10^{-5} i \quad (4)$$

که i برابر جریان در پیل سوختی است و مقاومت فعالیت برابر است با: (علامت منفی برای داشتن مقاومت با علامت مثبت لازم است)

دمای هوای محیط، T_a ، برابر ۲۵ درجه سلسیوس فرض شده و R_t برابر $\frac{0.4}{W}$ در نظر گرفته شده است. معادلات (۱) تا (۱۶) رفتار دینامیکی پیل سوختی را نشان می‌دهد. در اینجا از مطالعه رفتار دینامیکی سیستم‌های جانبی پیل سوختی نظیر کمپرسور، شیرها و غیره صرف‌نظر شده است.

۳-۲ مدل خازن با ظرفیت بالا

یک خازن ظرفیت بالا یک ابزار ذخیره ساز انرژی با ساختاری مشابه به باتری است. این خازن‌ها دارای دو الکترود است که در داخل الکترولیتی غوطه‌ور شده است و توسط یک جداکننده از هم جدا شده‌اند. الکترودها از یک ماده با سطح مقطع بسیار متخلخل ساخته می‌شوند. سطح مقطع الکترودهای مورد استفاده در این خازن‌ها برابر $\frac{m^2}{g}$ ۲۰۰۰-۵۰۰ است که بزرگتر از سطح مقطع الکترودهای مورد استفاده در باتری‌هاست. خازن‌های با ظرفیت بالا در جاهایی که نیاز به توان بالا در یک فاصله زمانی کوتاه دارند استفاده می‌شوند. استفاده از این خازن‌ها در ماشین‌های استفاده کننده از فیول سل توصیه شده است. این خازن‌ها ابزارهای ولتاژ پایین محسوب می‌شوند. معمولاً ولتاژ آن‌ها در حدود ۲٫۵ ولت می‌باشد. اما ظرفیت خازن‌های با ظرفیت بالای در دسترس از ۱۰ تا ۲۷۰۰ فاراد تغییر می‌کند. بانک‌های خازنی با اندازه ولتاژ ۴۲ ولت و بالاتر را می‌توان با این خازن‌ها تهیه کرد. ماژول‌های با ظرفیت بالا و ولتاژ بالاتر را می‌توان با سری کردن بانک‌های خازنی بزرگ و با قرار دادن یک سلول متعادل کننده اکتیو یا پسیو به وجود آورد. سلول متعادل کننده این اطمینان را می‌دهد که ولتاژ دو سر هر خازن تنها در یک بانک خازنی از محدوده مجاز خود تجاوز نمی‌کند. هر چند به کار گرفتن این طرح باعث ایجاد نشتی جریانی حدود ۱۰ تا ۵۰ میلی آمپر خواهد شد. برای سیستم هایبرید باد-فیول سل، یک ماژول خازنی ۴۳۵ فارادی و ۱۴ ولتی از شرکت ماکسول (www.maxwell.com) انتخاب شده است. برای دسترسی به ولتاژ مورد نظر در خروجی پیل سوختی، ۴ ماژول از این دست باید به طور سری به یکدیگر متصل

که در این رابطه، \dot{m} نرخ شار مولی به رطوبت ساز، V_a برابر حجم آند به لیتر، R برابر ثابت جهانی گازها $(0.0821 \frac{atm}{mol.K})$ ، T دمای پیل سوختی به کلوین، ρ چگالی مولی، U برابر سرعت مصرف سوخت، A مساحت سطح مقطع عبوری شار و F برابر ثابت فارادی می‌باشد $(96500 C)$. به طور مشابه معادله مربوط به کاتد برابر است با:

$$\frac{V_c}{RT} \cdot \frac{dP_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2 in} - (\rho_{O_2} UA)_{out} - \frac{i}{4F} \quad (11)$$

که V_c برابر حجم کاتد بر حسب لیتر است. حجم آند و کاتد در این مطالعه ۲ لیتر فرض شده است. موازنه کل انرژی حرارتی در یک بسته پیل سوختی خنک شونده با هوا به صورت زیر است:

$$Q_I = Q_S + Q_L \quad (12)$$

که در این معادله، Q_I برابر انرژی گرمایی تولید شده داخلی، Q_S برابر انرژی گرمایی ذخیره شده و Q_L برابر تلفات حرارتی به محیط پیرامون است. جریان پیل سوختی و مقاومت داخلی آن برای محاسبه تلفات حرارتی داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$i^2 (R_a + R_{int}) \times 65 = \text{حرارت تولید شده داخلی} \quad (13)$$

ضرب عدد ۶۵ در معادله بالا به خاطر داشتن ۶۵ سلول سری می‌باشد. انرژی حرارتی ذخیره شده در پیل سوختی برابر است با:

$$C_t \times \frac{dT}{dt} = \text{انرژی حرارتی ذخیره شده} \quad (14)$$

که C_T برابر ظرفیت حرارتی پیل سوختی است که در اینجا $\frac{J}{^\circ C}$ ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود و T برابر دمای پیل سوختی می‌باشد.

$$\text{تلفات حرارتی به محیط} = \frac{(T - T_a)}{R_t} \quad (15)$$

با جایگزینی معادلات (۱۳) تا (۱۵) در معادله (۱۲) و ساده سازی آن خواهیم داشت:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{130 \times i^2 (R_a + R_{int})}{C_t} - \frac{(T - T_a)}{R_t \times C_t} \quad (16)$$

جریان-ولتاژ الکترولایزر وابسته به دمایی است که در آن کار می‌کند. این مشخصه بسیار غیرخطی است و معمولاً با برازش منحنی (Curve Fitting) به دست می‌آید. با توجه به قانون فارادی، نرخ تولید هیدروژن در یک سلول الکترولایزر به طور مستقیم متناسب با نرخ انتقال الکترون‌ها در الکترودهاست که در واقع برابر جریان الکتریکی در مدار خارجی است:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F \cdot n_n \cdot i_e}{2F \left(\frac{\text{mol}}{s} \right)} \quad (19)$$

که i_e برابر جریان الکترولایزر، n_c برابر تعداد سلول‌های سری الکترولایزر و η_F برابر راندمان فارادی می‌باشد. راندمان فارادی، نسبت میان ماکزیمم هیدروژن تولیدی عملی به تئوری در الکترولایزر است. با فرض این‌که الکترولایزر در دمای ۴۰ درجه سلسیوس کار می‌کند، راندمان فارادی (به درصد) برابر است با:

$$\eta_F = 96.5 \times \exp\left(\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2}\right) \quad (20)$$

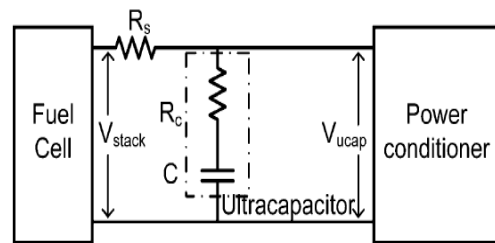
دو معادله بالا یک مدل ساده از الکترولایزر با فرض این‌که الکترولایزر دارای یک سیستم خنک کننده مستقل برای نگهداری دما در ۴۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

۳-۴- مدل مبدل توان DC/DC

سیستم انرژی‌هایبرید برای استفاده مجزا از شبکه طراحی می‌شود و ماژول مبدل دو مرحله‌ای برای تنظیم ولتاژ و فرکانس خروجی در مقدار استاندارد مورد نظر قرار می‌گیرد. مرحله اول شامل مبدل بالابرنده (Boost Converter) است که مقدار DC متغیر از فیول سل را (در وضعیت موازی شده با بانک خازنی با ظرفیت بالا) به مقدار ولتاژ DC ثابت بالاتری تبدیل می‌کند. در اینجا این مبدل توسط یک کنترلر PID کنترل می‌شود تا ولتاژ در باس ولتاژ بالا در مقدار ۲۰۰ ولت ثابت باقی بماند. این مسئله با تنظیم نسبت وظیفه (Duty Ratio)، D ، که از رابطه زیر به دست می‌آید، قابل دسترسی است:

$$\frac{V_{boost}}{V_{ucap}} = \frac{1}{1-D} \quad (21)$$

شوند. ماژول خازنی انتخاب شده دارای مقاومت سری ۴ میلی اهمی و جریان نشتی ۱۰ میلی آمپری است. برای اهداف شبیه سازی، جریان نشتی بانک خازنی ثابت فرض می‌شود. از جریان مورد نیاز فن خنک کننده بانک خازنی در اینجا صرف نظر می‌گردد. لذا می‌توان خازن با ظرفیت بالا را به وسیله یک خازن سری با یک مقاومت شبیه سازی کرد. ۴ ماژول خازنی با ظرفیت بالا که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند، در مجموع ظرفیتی برابر ۱۰۸,۷۵ فاراد و مقاومت سری برابر ۱۶ میلی اهم دارد. ماژول خازنی با این ویژگی‌ها به صورت موازی با فیول سل کار می‌کند تا نوسانات ولتاژ را که بر اثر تغییرات ناگهانی بار شکل می‌گیرد را کاهش دهد (شکل ۲).



شکل ۲: بانک خازنی موازی با فیول سل

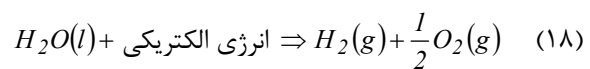
خازن با ظرفیت بالا به صورت یک فیلتر پایین گذر با تابع انتقال زیر مدل شده است:

$$\frac{V_{ucap}}{V_{stack}} = \frac{s + \frac{1}{R_c C}}{s \left(1 + \frac{R_s}{R_c} \right) + \frac{1}{R_c C}} \quad (17)$$

که در این مطالعه $C = 108.75 \mu F$ ، مقاومت سری $R_s = 0.01 \Omega$ و $R_c = 4 m\Omega$.

۳-۳- مدل دینامیکی الکترولایزر

تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن می‌تواند با استفاده از عبور جریان الکتریکی از میان دو الکتروده که به وسیله یک الکترولیت آبی جدا شده‌اند حاصل شود. کل فرآیند الکترولایزر به صورت زیر است:



یک سیستم الکترولایزر متشکل از چندین سلول الکترولایزر است که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. مشخصه

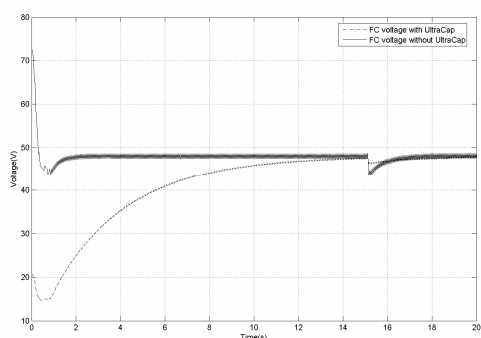
۳-۵- مدل مبدل توان DC/AC

مدل ریاضی سیستم شرح داده شده در محیط SIMULINK در نرم افزار MATLAB با تغییر مقدار بار متصل به سیستم در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شد و نتایج آن در ادامه ارائه می شود. سیستم مورد نظر شامل ۸ زیر سیستم اصلی است: پیل سوختی، الکترولیزر، ابرخازن، اینورتر، بوستر، ذخیره ساز هیدروژن و کنترلر دبی های جرمی هیدروژن و اکسیژن. هر یک از این زیرسیستمها شامل بلوکهای مختلفی هستند که نمایش ریاضی معادلات ارائه شده می باشند.

در ابتدا برای یافتن پاسخ پیل سوختی به اغتشاش پله ای بار، جریان بار در زمان $t = 15s$ از مقدار پایه ۱۵ آمپر به ۲۱ آمپر به صورت پله ای افزایش یافته است. پاسخ سیستم عملکرد مطلوب کنترلرها و ابرخازن را نشان می دهد.

در شکل منحنی های ولتاژ بار در دو حالت استفاده از ابرخازن و بدون استفاده از آن نشان داده شده است. افت ولتاژ در لحظات اولیه در خروجی پیل سوختی با ابرخازن به این دلیل است که در این بازه زمانی، ابرخازن نیاز به جریان اولیه جهت شارژ خود دارد. اما پس از گذشت لحظات اولیه، شرایط پایداری در ولتاژ دو سر آن ایجاد می شود.

سپس پاسخ پیل سوختی به نوسانات پریودیک بار مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت بار ثابت ۱۰ آمپری به همراه بار نوسانی با دامنه ۵ آمپر و فاصله زمانی ۲ ثانیه به پیل سوختی اعمال گردید. شکل ۲ نمایش شکل موج ولتاژ خروجی پیل سوختی با ابرخازن و بدون آن می باشد. پاسخ پیل سوختی به این بار دارای نوساناتی با دامنه ۳ ولت می باشد در حالی که اثر ابرخازن باعث کاهش دامنه این نوسانات به حدود ۰,۵ ولت شده است.



شکل ۳: ولتاژ پیل سوختی در پاسخ به اغتشاش پله ای بار.

از آنجا که طرح پیشنهادی، یک سیستم مجزا از شبکه است، یک اینورتر در وضعیت کنترل ولتاژ مورد نظر قرار می گیرد، برخلاف روش کنترل جریان، که معمولاً به اینورترهای متصل به شبکه اعمال می گردد. از اینورتر PWM منبع ولتاژ تک فاز (VSI) برای کار در کنترلر PID استفاده می شود که مازول را برای دسترسی به ولتاژ ۱۲۰ ولت و ۵۰ هرتز تنظیم می کند. فرکانس موج حامل مثلثی برابر ۸ کیلوهرتز می باشد.

۳-۶- کنترلرها

با توجه به ماهیت غیر خطی سیستم و طولانی بودن زمان پاسخ به تغییرات بار و وجود خطای ماندگار قابل توجه، نیاز به استفاده از کنترلر احساس می شود. تابع انتقال کلی یک کنترلر PID به صورت زیر نوشته می شود:

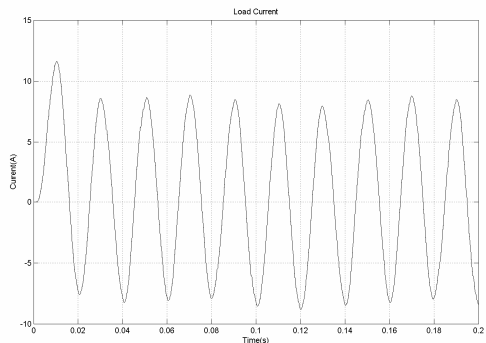
$$G_r(s) = \left(s + T_d s^2 + \frac{1}{T_i} \right) \cdot \frac{K_P}{s} \quad (22)$$

کنترلر پیل سوختی وظیفه کنترل ولتاژ پیل سوختی را با تغییر میزان ورود هیدروژن و اکسیژن برعهده دارد. محدودکننده ها در خروجی هر کنترلر استفاده می شوند تا فشار گاز را در پیل سوختی محدود کنند. برای تعیین پارامترهای حلقه باز سیستم کنترلی PID از روش Ziegler-Nicols استفاده شده است.

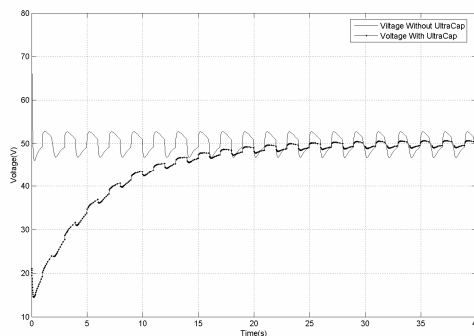
جدول ۱: مقادیر ضرایب کنترلرهای دبی جرمی هیدروژن و اکسیژن.

	کنترلر جریانهای ورودی پیل سوختی		تقویت کننده
	جریان اکسیژن	جریان هیدروژن	
K_p	۲,۱۷	۵,۰۰	۵,۰۰
T_i	۰,۵	۰,۵	۲,۰۰
T_d	۰	۰	۰

۴- شبیه سازی و بررسی نتایج



شکل ۷: جریان بار.



شکل ۴: ولتاژ پیل سوختی در پاسخ به اغتشاشات پرریودیک بار.

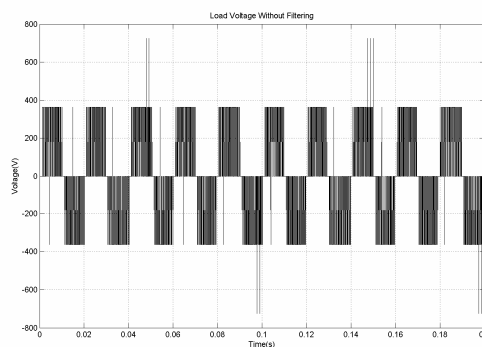
۵- نتیجه گیری

سیستم‌های تولید انرژی هایبرید بهترین گزینه برای مناطق دوارز شبکه (تولید پراکنده) هستند. سیستم هایبرید باد-پیل سوختی برای عملکرد جدا از شبکه در این مقاله پیشنهاد شده است. مدلسازی و شبیه سازی دینامیکی سیستم مورد نظر در اینجا مورد بررسی قرار گرفت. روابط ارائه شده در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شده است. در نتایج شبیه سازی ارائه شده تعقیب بار و تثبیت ولتاژ مشهود است.

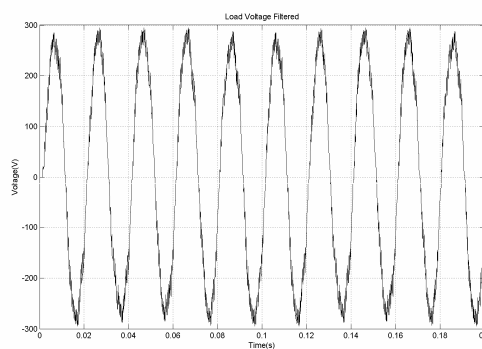
۶- مراجع

- [1] Anne-Marie Borbely, "Distributed Generation: The power paradigm for the new Millenium", 2001.
- [2] N. Jenkins, "Embedded Generation", IEE Series, 2004.
- [3] Costamagna P, Srinivasan S. "Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000. Part II. Engineering, technology development and application aspects" Journal of Power Sources 2001; 02:253-69.
- [4] Agbossuo K, Chahine R, Hamelin J, Laurencelle, Hamelin J. "Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications," Journal of Power Sources 2001;96:168-72.
- [5] M. Tariq Iqbal, "Dynamics of a wind fuel cell hybrid energy system", NF, Canada, 2004.
- [6] E.Muljadi, C. Wang, M.H. Nehrir, "Parallel Operation of Wind Turbine, Fuel Cell, and

چون ولتاژ اعمالی به بار از نوع AC است، باید از یک اینورتر تکفاز برای تبدیل ولتاژ DC خروجی پیل سوختی به AC استفاده شود. برای این منظور، از یک اینورتر ۴ پالس بعد از بوستر استفاده شده است. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب ولتاژ خروجی اینورتر، ولتاژ فیلتر شده اعمالی به بار و جریان بار را نشان می‌دهند.



شکل ۵: ولتاژ خروجی اینورتر بدون فیلترینگ.



شکل ۶: ولتاژ خروجی اینورتر بعد از فیلترینگ.

- Diesel Generation Sources*”, IEEE Power Engineering Society, Denver, Colorado, 2004.
- [7] Kuo BC. “*Automatic control systems*,” 7th ed. Prentice Hall Inc; 1995.
- [8] Rowe A, Li X,” *Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells*,” Journal of Power Sources 2001; 102:82–96.
- [9] Mann RF, Amphlett JC, Hooper M, Jensen HM, Peppley BA, Roberge PR,”*Development and application of a generalized steady state electrochemical model of a PEM fuel cell*,” Journal of Power Sources 2000; 86:173–80.
- [10] Sapru K, Stetson NT, Ovshinsky SR,” *Development of a small scale hydrogen production storage system for hydrogen applications*,” Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, vols. 3–4. 1997.
- [11] Southwest Windpower Inc., 2131 North First Street, Flagstaff, AZ 86004, USA. URL: <http://www.windenergy.com>.