

کنترل سیستم ترکیبی پیل سوختی پلیمری و باتری جهت حفظ راندمان در نقطه بهینه

سید مهدی رخت اعلا^۱

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۴/۷

چکیده:

در این مقاله، سیستم هیبرید پیل سوختی پلیمری با باتری سرب-اسید مورد بررسی قرار گرفته است به طوری که از یک باتری جهت پشتیبانی از سیستم پیل سوختی در تامین توان مورد نیاز بار و همچنین ذخیره توان اضافی تامین شده توسط آن استفاده شده است. از راهبرد کنترل توان ثابت برای پیل سوختی و کنترل SOC باتری جهت حفظ راندمان پیل سوختی در نقطه کاری بهینه و کاهش استرس ولتاژ بر روی باتری و کاهش استرس جریان لحظه ای بر روی پیل سوختی استفاده شده است. پیکربندی کلی سیستم هیبرید شامل پیل سوختی پلیمری که بعد از آن یک کنورتر بوسست قرار می‌گیرد و همچنین یک بانک باتری سرب-اسید است، که بعد از آن مبدل دوجته جهت کنترل توان باتری در مد شارژ و دشارژ در سیستم قرار می‌گیرد. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، مشاهده گردید که مشارکت توان بین پیل سوختی و باتری در برابر تغییرات بار بخوبی صورت گرفته و پیل سوختی همواره توان ثابتی را جهت شارژ باتری و تامین بار تولید کرده و در برابر هر نوع نوسانات و اغتشاشات بار محافظت گردیده است.

کلمات کلیدی:

راهبرد کنترل، باتری، پیل سوختی پلیمری، مبدل دوجته، مبدل افزایشی

مقدمه

فناوری پیل سوختی به عنوان انرژی پاک، گزینه مناسبی در اکثر کاربردهای صنعتی جهت حفظ محیط زیست از آلودگی زیست محیطی به جای سوخت های فسیلی مورد استفاده قرار می گیرد. بکارگیری سیستم پیل سوختی به تنهایی جوابگوی تمام درخواست بار بخصوص در زمانهای پیک بار نخواهد بود. بنابراین، ترکیب سیستم پیل سوختی با یک سیستم ذخیره انرژی^۱ منجر به کاهش هزینه و بهبود عملکرد می گردد. در بسیاری از کاربردهای ترکیبی از باتری به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده می شود. باتری در این سیستمها موجب تنظیم و حفظ توان پیل سوختی در حد قابل قبول خواهد شد. از آنجا که سیستم پیل سوختی و باتری دارای مشخصه های متفاوت می باشد، برای بهبود عملکرد سیستم و کاهش مصرف پیل سوختی، به راهبرد مدیریت توان مناسب نیاز خواهد بود. در این مقاله، هدف اصلی کنترلر، تثبیت ولتاژ باس DC و تنظیم حالت شارژ باتری در محدوده مجاز می باشد. این عمل از طریق اعمال پالس های سوئیچینگ بروی مبدل بوست و مبدل دو جهته، که ارتباط بین باتری و باس DC را برقرار می نماید، انجام شده است. در مرجع [۱]، مطالعاتی بروی سیستم ترکیبی پیل سوختی و باتری در کاربردهای وسایل نقلیه ارائه شده است. در این سیستم از کنترلر فازی جهت مدیریت تقسیم توان استفاده شده است. هدف اصلی کنترلر در این مقاله، تثبیت ولتاژ باس DC و تنظیم حالت شارژ باتری در محدوده مجاز می باشد. در مرجع [۷]، مطالعاتی در ارتباط با سیستم ترکیبی پیل سوختی و سوپرکازن در کاربردهای نقلیه انجام شده است. تمرکز اصلی در این مطالعه بروی الگوریتم کنترلر فازی می باشد که این کنترلر قادر به تعیین مقدار توان مورد نیاز از پیل سوختی بوده و ولتاژ باس DC را در محدوده نامی حفظ می نماید.

سامان احمدی و بطحایی (۱۳۹۳) در خودروهای الکتریکی هیبریدی، ترکیب پیل سوختی با باتری و ابرخازن را ارائه دادند. در چنین ترکیبی با ارائه راهبردی هوشمند و کنترلر فازی، مدیریت بهینه انرژی در منابع توان خودروی هیبریدی پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که در میزان صرفه جویی سوخت، حفظ وضعیت شارژ باتری و سوپرکازن، بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش کارایی را به همراه دارد.

حسن زاده و فرزاد (۱۳۹۱) استفاده از یک سیستم فتوولتاییک جهت تولید هیدروژن و در کنار آن یک سیستم پیل سوختی جهت تامین حرارت و الکتریسیته ارائه نمودند. در این مقاله، امکان سنجی فنی و اقتصادی استفاده از یک سیستم ترکیبی فتوولتاییک-پیل سوختی در کاربری های مسکونی جهت تولید همزمان برق و حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که در حال حاضر، سیستم فتوولتاییک اقتصادی ترین سیستم ترکیبی است، ولی استفاده از پیل سوختی در کنار این سیستم در کاربردهای مسکونی توجه پذیر

1) Energy Storage System

نیست. پیش بینی می شود که با افزایش قیمت حامل های انرژی و همچنین کاهش هزینه نصب و راه اندازی، سیستم های پیل سوختی در آینده واجد صرفه اقتصادی خواهد داشت.

رخت اعلا و همکارانش در سال (۱۳۸۸) مقاله ای برای کنترل مبدل دو جهته در سیستم هیبرید مبتنی بر پیل سوختی پلیمری ارائه دادند که در آن ، کنترلر مورد نظر برای کنترل مبدل دو جهته، کنترل مد لغزشی است که این کنترلر یک کنترلر غیرخطی و مقاوم در برابر هر نوع اغتشاش است ولی سیستم بکار رفته در این مقاله صرفاً از سیستم پیل سوختی تشکیل شده و سیستم ترکیبی پیل سوختی و باتری استفاده نشده است.

در این مقاله، از انرژی پیل سوختی پلیمری به عنوان منبع توان اصلی استفاده می شود در حالی که باتری سرب - اسید به عنوان منبع توان کمکی محسوب می گردد. به دلیل دینامیک کند سیستم پیل سوختی، از منبع توان کمکی باتری سرب - اسید در این مقاله برای استفاده در DGها استفاده شده است. جهت استفاده از این سیستم هیبرید، الگوریتمی ارائه شده که نحوه تامین بار و شارژ و دشارژ باتری را بیان می کند. در این الگوریتم اگر توان مورد نیاز بار از توان تولیدی توسط پیل سوختی کمتر باشد، آنگاه کل بار توسط پیل سوختی تامین می گردد. اما اگر توان مورد نیاز بار از توان تولیدی پیل سوختی بیشتر باشد، آنگاه باید این کمبود توان را با توجه به حالت شارژ باتری و میزان توان نامی باتری تامین کرد. اما اگر توان مورد نیاز بار از توان تولیدی پیل سوختی کمتر باشد، از این توان اضافی جهت شارژ باتری استفاده می شود.

در این مقاله، با توجه به شبیه سازی انجام شده، مشاهده گردید که مشارکت توان بین پیل سوختی پلیمری و باتری سرب-اسید در مواقع تغییر بار بخوبی صورت گرفته است. پیل سوختی همواره جریانی ثابتی را جهت شارژ باتری و تغذیه بار تولید کرده و در برابر نوسانات بار محافظت گردیده است. در بخش ۲، مدل سازی سیستم پیل سوختی پلیمری و اساس و عملکرد آن ارائه شده است. در بخش ۳، واحد آماده سازی توان معرفی گردیده است. در بخش ۴، ساختار کنورتر بوست بیان شده است. در بخش ۵، کنورتر دو جهته مورد بررسی قرار گرفته است و در بخش ۶ نتایج شبیه سازی نشان داده شده اند و نتیجه گیری مقاله و کارهای انجام شده در بخش ۷ ارائه شده است.

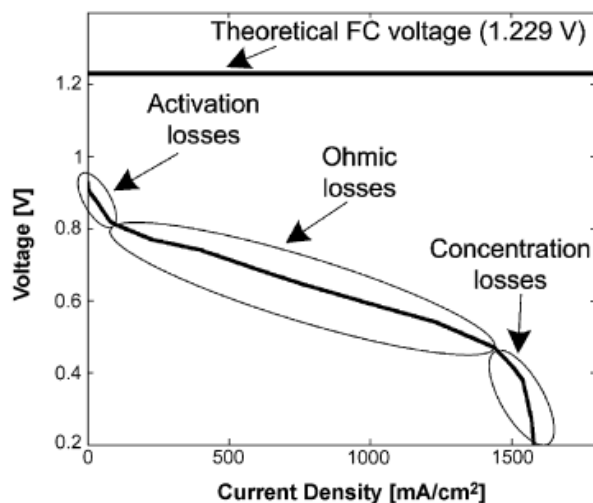
مدل سازی پیل سوختی PEM^۱

پیل سوختی، انرژی شیمیایی را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. در پیل سوختی سه نوع تلفات وجود دارد: ۱. تلفات فعال سازی^۲ ۲. تلفات اهمی^۳ ۳. تلفات غلظت^۱. منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی با نمایش تلفات آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

1) Proton Exchange Membrane

2) Activation Losses

3) Ohmic Losses



شکل (۱) منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی (منحنی ولتاژ- جریان) [۷]

پارامترهای مدل سیستم پیل سوختی پلیمری در جدول (۱) نشان داده شده است. ولتاژ ایده‌آل یک پیل سوختی هیدروژن / اکسیژن، تحت شرایط استاندارد یک اتمسفر و ۲۵ درجه سلسیوس، برابر $1/229V$ است. اما ولتاژ واقعی پیل سوختی کمتر از مقدار ولتاژ ایده‌آل آن است، زیرا افت ولتاژهایی در پیل سوختی رخ می‌دهد. با در نظر گرفتن این افت ولتاژها، ولتاژ خروجی پیل سوختی با عبارت زیر بیان می‌شود:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohmic} \quad (1)$$

با توجه به رابطه ۱، ولتاژ لحظه‌ای نرنست (E_{Nernst}) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲]، [۳]، [۴]:

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times \ln(P_{H_2} + \frac{1}{2} P_{O_2}) \quad (2)$$

جدول (۱) پارامترهای مدل سیستم پیل سوختی پلیمری

مقاومت معادل متناظر مجموع مقاومت‌های غلظت و فعال‌سازی (Ω)	R_a	مساحت ناحیه‌ی فعال‌سازی cm^2	A
ثابت مولی اکسیژن $Kmol / atms$	K_{O_2}	ثابت به کار رفته در مدل‌سازی افت ولتاژ غلظت (V)	B
ثابت مولی هیدروژن $Kmol / atms$	K_{H_2}	ظرفیت خازنی معادل، دوپل (F)	C
مقاومت داخلی اهمی پیل سوختی (Ω)	R_{ohmic}	غلظت اکسیژن حل شده در سطح کاتالیزور کاند	Co_2
دمای پیل سوختی (k°)	T	ولتاژ لحظه‌ای نرنست (V)	E_{Nerns}
پارامترهای تجربی مورد استفاده در مدل‌سازی تغییرات دمای پیل سوختی	$T_0, T_{rt}, T_{ic}, T_{it}$	ثابت فارادی ($C(kmol)^{-1}$)	F
ضریب مصرف	U	جریان پیل سوختی (A)	I_{FC}
افت ولتاژ فعال‌سازی (V)	V_{act}	چگالی جریان ($A(cm)^{-2}$)	J
افت پتانسیل در R_a (V)	V_d	حداکثر چگالی جریان ($A(cm)^{-2}$)	J_{man}
افت ولتاژ غلظت (V)	V_{conc}	تعداد استک‌های سری	N_s
افت ولتاژ اهمی (V)	V_{ohmic}	تعداد استک‌های پیل سوختی موازی شده	N_p
ولتاژ پیل سوختی (V)	V_{FC}	فشار جزئی هیدروژن (atm)	P_{H_2}
ولتاژ استک (V)	V_{Stack}	فشار جزئی اکسیژن (atm)	P_{O_2}
ثابت مدل‌سازی $kmol / (sA)$	K_r	مقدار دبی هیدروژن که برای تأمین تغییرات بار لازم است ($kmol(s)^{-1}$)	q_{H_2}
ثابت‌های به کار رفته در مدل‌سازی افت ولتاژ فعال‌سازی	$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	نسبت دبی اکسیژن و هیدروژن	r_{HO}
ثابت زمانی هیدروژن (s)	T_{0H_2}	ثابت زمانی اکسیژن (s)	T_{0O_2}

دبی مولی هیدروژن مورد نیاز سیستم پیل سوختی پلیمری در جریان بار مورد نیاز در رابطه (۳)، نوشته شده است:

$$q_{H_2} = \frac{I_{FC} \times N_s \times N_p}{2FU} \quad (3)$$

$$P_{H_2} = [q_{H_2} - (2K_r \cdot I_{FC})] \times \frac{1/K_{H_2}}{T_{0H_2}S + 1} \quad (4)$$

$$P_{O_2} = \left[\frac{q_{H_2}}{r_{H-O}} - (K_r \cdot I_{FC}) \right] \times \frac{1/K_{O_2}}{T_{0O_2}S + 1} \quad (5)$$

بعلاوه، دمای پیل سوختی در معادله (۲) نشان داده شده است [۵]:

$$T = 273 + T_0 + (T_0 - T_{it} + T_{ic} \times I_{FC}) (1 - \exp(\frac{-t \times I_{FC}}{T_{it}})) \quad (6)$$

در عبارت زیر، افت ولتاژ فعال سازی که در سیستم پیل سوختی رخ می دهد، آمده است [۷،۶]:

$$V_{act} = \zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T (\ln(I_{FC})) + \zeta_4 (\ln(CO_2)) \quad (7)$$

در معادله (۷)، غلظت اکسیژن حل شده در سطح گاز/ مایع، با عبارت قانون هانری به فرم زیر تعریف می شود [۶،۸]:

$$CO_2 = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^{-6} \exp(\frac{-498}{T})} \quad (8)$$

افت ولتاژهای اهمی در سیستم پیل سوختی، با قابلیت هدایت پروتون الکترولیت پلیمری جامد و مقاومت های الکتریکی داخلی مرتبط است. بنابراین، افت ولتاژ اهمی در پیل سوختی برابر است با [۹]:

$$V_{ohmic} = I_{FC} \times R_{ohmic} \quad (9)$$

$$J = \frac{I_{FC}}{A} \quad (10)$$

افت ولتاژ غلظت در سیستم پیل سوختی ناشی از انتقال جرم است که آن نیز به نوبه خود غلظت هیدروژن و اکسیژن را در چگالی جریان های بالا تحت تأثیر قرار می دهد. معادله افت ولتاژ غلظت پیل سوختی به صورت رابطه زیر بیان می شود [۱۰]:

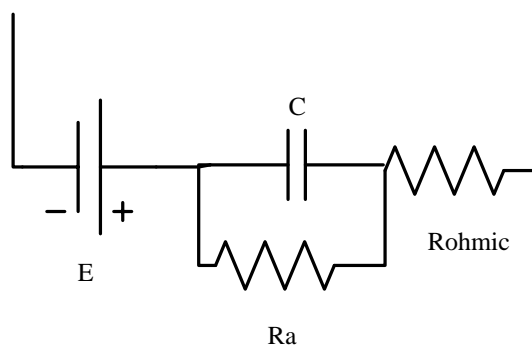
$$V_{conc} = B \times \ln(1 - \frac{J}{J_{max}}) \quad (11)$$

یک پدیده الکتروشیمیایی مهم که ولتاژ سلول را به تغییرات جریان بار در سیستم پیل سوختی مرتبط می کند، اثر شارژ خازنی لایه دوبل^۱ است. مدار معادل الکتریکی با در نظر گرفتن اثر شارژ خازنی لایه دوبل در شکل (۳) نشان داده شده است [۴].

این خازن الکتریکی بیانگر لایه ای از بار بر روی یا نزدیک سطح مشترک الکترو- الکترولیت است که بار و انرژی الکتریکی را ذخیره می کند [۷]. با در نظر گرفتن این اثر خازنی، دینامیک ولتاژ خروجی پیل سوختی به طور دقیق تر به دست

1) Charge Double Layer

می‌آید. مقاومت R_a در شکل (۲) بیانگر مجموع مقاومت‌های غلظت و فعال‌سازی و برابر است [۱۳,۷]:



شکل (۲) مدار معادل الکتریکی پیل سوختی با خازن شارژر دوپل

$$R_a = \frac{V_{act} + V_{conc}}{I_{FC}} \quad (12)$$

طبق اثر خازن شارژر دوپل، معادله دیفرانسیلی مرتبط با افت ولتاژ روی مقاومت R_a برابر است با [۸,۶]:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_{FC}}{C} - \frac{V_d}{R_a C} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن ترکیبی از اثرات ترمودینامیکی، انتقال جرم، انرژی جنبشی، مقاومت اهمی، تغییرات ولتاژ خروجی پیل سوختی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸,۷]:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_d - V_{ohmic} \quad (14)$$

نهایتاً ولتاژ یک استک پیل سوختی که از N_S سلول سری شده تشکیل شده، برابر است با [۱۳,۱۱]:

$$V_{stock} = N_S \cdot V_{FC} \quad (15)$$

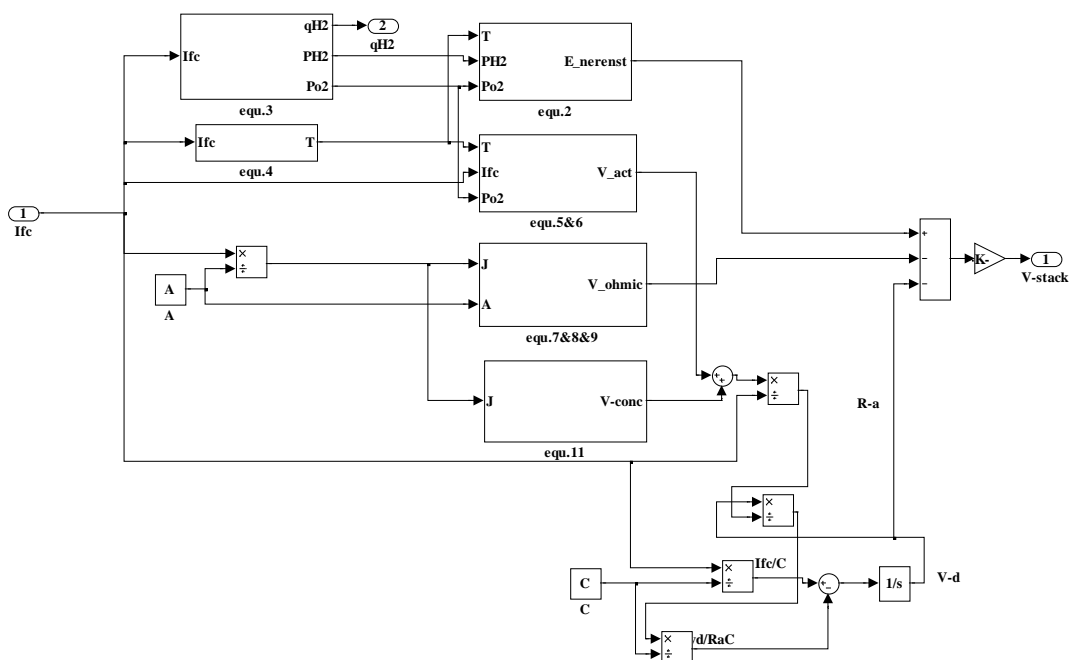
مشخصات نامی پیل سوختی و پارامترهای عملیاتی برای مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری در جدول (۲) با جزئیات ذکر شده است:

جدول ۲) مشخصات پیل سوختی و پارامترهای عملیاتی

تعداد سلولها: N	۵۵
توان نامی استک	۶ kw
توان ماکزیمم استک	۸/۳kw
ولتاژ مدتر باز	۶۵ v
بازده نامی	۴۶%
دمای سیستم	۳۲۸ کلوین
ثابت عمومی گازها R	۸/۳۱۴[J/mol-K]
ثابت فاراده F	۹۶۴۸۵[C/mole]
سیخ مقطع A	۲۳۲ [cm ²]
ثابت زمانی اکسیژن τ_{O_2}	۳/۳۷
ثابت زمانی هیدروژن τ_{H_2}	۰/۳۰۹۶
ξ_1	-۰/۹۵۱۴
ξ_2	۰/۰۰۳۱۲
ξ_3	۷/۴×۱۰ ^{-۴}
ξ_4	-۰/۰۰۰۱۸۷
R_{ohmic}	۲/۴۵ × ۱۰ ^{-۴} [K Ω cm ²]
B	۰/۰۴۷۷۷

روابط و معادلات ریاضی نوشته شده برای سیستم پیل سوختی در روابط (۱-۱۵) که نشاندهنده عملکرد و مدل پیل سوختی پلیمری است، آورده شده و در نرم افزار متلب^۱ و در محیط سیمولینک شبیه سازی شده است. شکل (۳) مدل پیل سوختی پلیمری (PEM) را نشان می‌دهد.

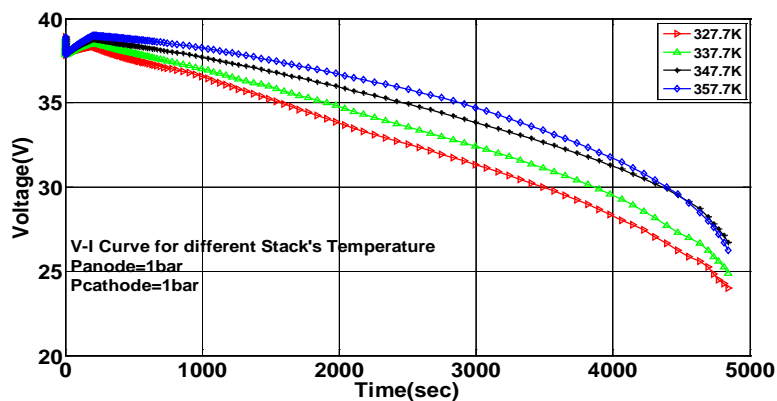
1) MATLAB



شکل ۳) بلوک کلی شبیه سازی پیل سوختی پلیمری

شبیه سازی پیل سوختی در دماها و فشارهای متفاوت- تاثیر دما بر عملکرد پیل سوختی پلیمری

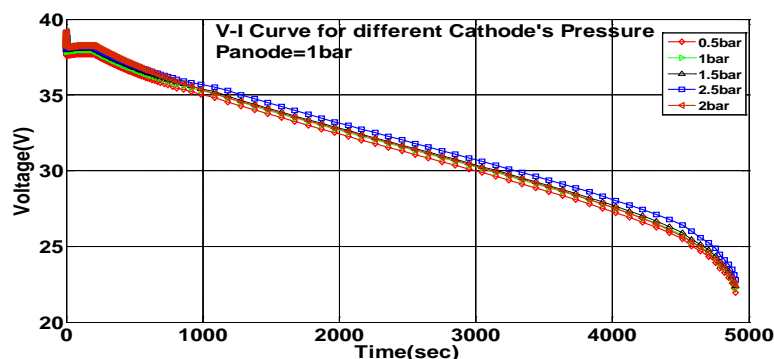
با استفاده از شبیه سازی مدل در دمای مختلف که بازه عملکرد مناسب برای سیستم پیل سوختی PEM بین ۵۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس است، عملکرد پیل سوختی با اعمال جریان پله ای (IA) منحنی پلاریزاسیون در دماهای مختلف رسم شده است. در منحنی های پلاریزاسیون مشاهده می شود که با افزایش دما، منحنی پلاریزاسیون به سمت بالا منتقل شده و می توان بیان کرد که با افزایش دما مقدار جریان و ولتاژ گرفته شده از استک افزایش می یابد. از آنجا که از رابطه های (۱) و (۲) می توان مشاهده نمود که ولتاژ نرنست و نهایتاً ولتاژ استک پیل سوختی با دمای استک رابطه مستقیم دارد و با افزایش دما، ولتاژ پیل سوختی افزایش می یابد و در این شبیه سازی هم می توان مشاهده نمود که نمودار منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی در دماهای ۳۲۷,۷ درجه کلونین (۵۴,۵ درجه سلسیوس) تا درجه ۳۵۷,۷ درجه کلونین (۸۴,۵ درجه سلسیوس) با افزایش دما منحنی ولتاژ در جهت افزایش ولتاژ میل کرده است. شبیه سازی و آزمایش های انجام شده در منحنی شکل(۴) در فشار ثابت و در دمای متغییر برای استک ۵۰۰ وات تا جریان ۲۵ آمپر و فشار آند ۱ بار و فشار کاتد ۱ بار زیر انجام شده است.



شکل ۴) منحنی پلاریزاسیون حاصل از شبیه سازی در دمای مختلف

تاثیر فشار کاتد بر عملکرد پیل سوختی پلیمری

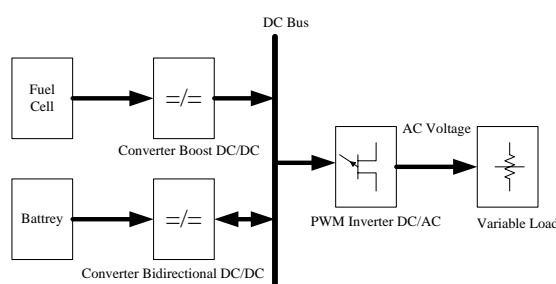
با استفاده از شبیه سازی در فشارهای مختلف در سمت کاتد و در دمای ثابت و فشار آند ثابت و با اعمال جریان پله‌ای (IA) منحنی پلاریزاسیون رسم شده و تاثیر فشار کاتد بر منحنی پلاریزاسیون در شکل (۵) مشاهده شده است که محدوده عملکرد برای سیستم پیل سوختی در سمت آند برای حالت پیاده سازی عملی بین ۰/۵ بار تا ۳ بار است. از نتایج شبیه سازی می توان بیان کرد که با افزایش فشار، مقدار جریان و ولتاژ گرفته شده از استک افزایش می یابد. از آنجا که از رابطه‌های (۱) و (۲) می توان مشاهده نمود که ولتاژ نرنست و نهایتاً ولتاژ استک پیل سوختی با P_{O_2} رابطه مستقیم دارد و با افزایش فشار سمت کاتد (P_{O_2}) ولتاژ پیل سوختی افزایش می یابد و در این شبیه سازی هم می توان مشاهده نمود که نمودار منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی در فشار ۰/۵ بار تا ۲ بار با افزایش فشار منحنی ولتاژ در جهت افزایش ولتاژ میل کرده است. در منحنی های پلاریزاسیون با افزایش فشار کاتد منحنی پلاریزاسیون به سمت بالا منتقل شده و می توان بیان کرد که با افزایش فشار کاتد مقدار جریان و ولتاژ گرفته شده از استک افزایش می یابد.



شکل ۵) منحنی پلاریزاسیون حاصل از شبیه سازی در فشار کاتد مختلف

واحد آماده‌سازی توان^۱ (PCU)

ولتاژ خروجی پیل سوختی در استک‌های سری شده، یک ولتاژ DC کنترل نشده است که با تغییرات بار، نوسان می‌کند. این ولتاژ باید به ولتاژ DC کنترل شده تبدیل شود. واحد PCU فرکانس الکتریکی را کنترل می‌کند و هارمونیک‌ها را در سطح قابل قبول نگاه می‌دارد. پیکربندی کلی سیستم شامل یک پیل سوختی است که بعد از آن یک کنورتر بوست قرار می‌گیرد و همچنین شامل یک بانک باتری است که بعد از باتری مبدل دوجته و سپس یک اینورتر قرار می‌گیرد. ولتاژ کنترل شده بدست آمده پس از اینکه فیلتر شد، به اینورتر DC/AC فرستاده می‌شود. کنورتر بوست به عنوان یک واسطه بین سیستم پیل سوختی و سیستم اینورتر قرار می‌گیرد. سیستم‌های پیل سوختی متصل شده به شبکه شامل باتری ذخیره‌کننده است. این توپولوژی در شکل (۶) نشان داده شده است [۹].



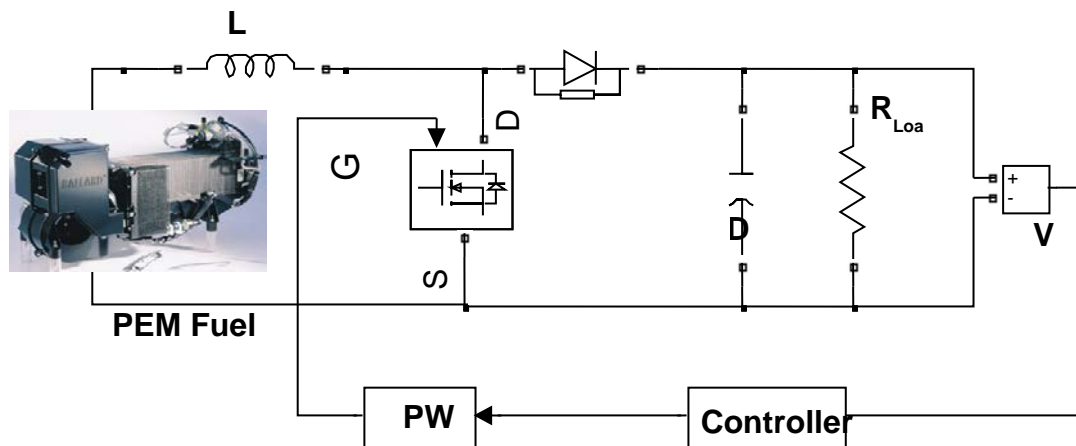
شکل ۶) توپولوژی اتصال به شبکه

کنورتر بوست DC/DC

کنورتر قدرت باید از سیستم کنورتر در برابر نوسانات خروجی، جریان‌های معکوس و تغییرات ناگهانی بار محافظت کند و طول عمر کامل آن را تضمین نماید. ولتاژ خروجی همیشه بزرگتر از ولتاژ ورودی است. تجهیزاتی که با باتری تغذیه می‌شوند از کنورتر افزایش‌دهنده DC/DC جهت تولید ولتاژی بالاتر از ولتاژ باتری استفاده می‌کنند [۹].

شکل (۷) یک مد عملکرد پیوسته حلقه بسته کنورتر بوست DC/DC را نشان می‌دهد. مزیت اصلی کنورتر بوست، بازده بالا و تعداد مولفه‌های کم است و می‌تواند ولتاژ رگوله نشده را با تغییر سیکل کاری در فرکانس سوئیچینگ بالا به ولتاژ مطلوب رگوله شده تبدیل کند و باعث کاهش اندازه و هزینه مولفه‌های ذخیره‌کننده انرژی شود.

1) Power Condition Unit

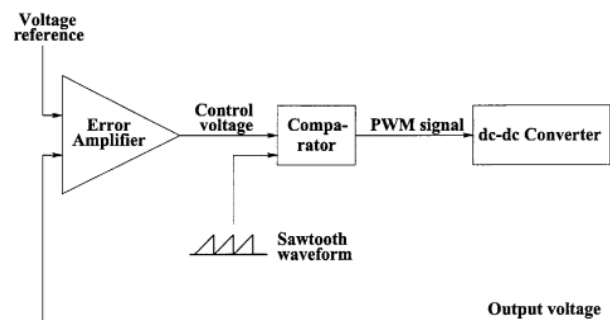


شکل ۷) ساختار نمونه‌ای کنورتر بوسست DC/DC با کنترل فیدبک

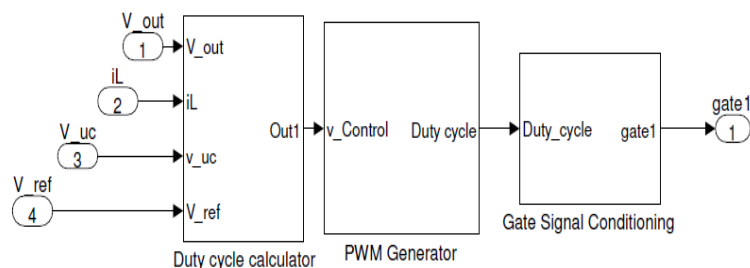
راهبرد کنترل کنورتر بوسست DC/DC

خروجی کنورتر DC/DC یک ولتاژ افزایش یافته است که به بار یا به مرحله بعدی فرستاده می‌شود. ولتاژ افزایش یافته خروجی با یک ولتاژ DC مرجع (V_{ref}) جهت تولید یک سیگنال خطا مقایسه می‌شود. خطا به عنوان ورودی به کنترلر PID فرستاده می‌شود و در آنجا این سیگنال خطا با یک موج دندان اره‌ای مقایسه می‌گردد. مقایسه‌کننده یک سیگنال PWM تولید می‌کند که این سیگنال PWM به درایورهای سویچ‌های قدرت فرستاده می‌شود. بنابراین، کنورتر قدرت DC/DC توسط سیگنال کنترل on و off می‌شود تا ولتاژ خروجی متوسط را در سطح مطلوب نگاه دارد [۷، ۹].

بلوک دیاگرام کنترل کنورتر DC/DC در شکل (۸) و جزئیات بلوک کنترلی در شکل (۹) نشان داده شده است.



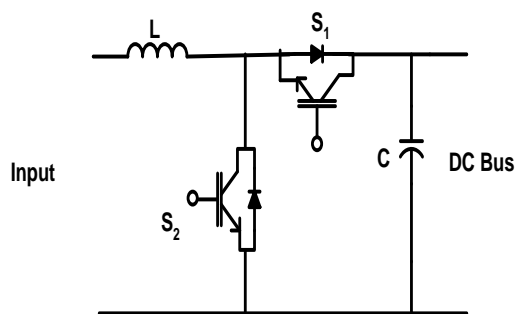
شکل ۸) بلوک دیاگرام کنترل کنورتر DC/DC



شکل ۹) جزئیات بلوک کنترلی

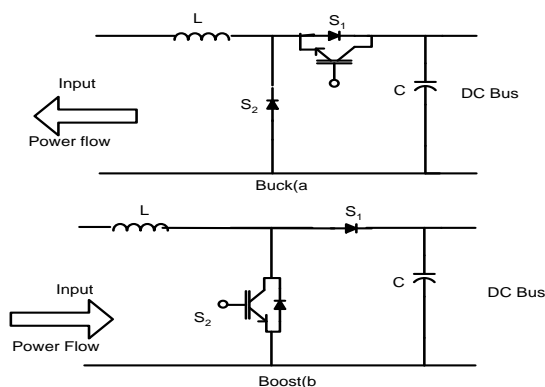
کنورترهای دوجتهه^۱

سطرهای باتری و سوپرکازن، به عنوان ذخیره‌کننده انرژی، جهت پاسخ‌گویی سریع به تغییرات سریع بار که توسط پیل سوختی نمی‌توانست دنبال شود و باعث ایجاد تأخیر در راه‌اندازی سرد پیل سوختی می‌شد، به کار می‌روند. دیاگرام مدار مبدل DC کنترل‌پذیر دوجتهه پیشنهادی، در این توپولوژی، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. دو سویچ اصلی S_1 و S_2 از یک پایه کنورتر هستند و توسط سیگنال‌های گیت، براساس مد عملکرد مدار، کنترل می‌شوند. وقتی جهت پخش توان از سمت ولتاژ- بالا (باس DC) به سمت ولتاژ- پایین (باتری) است، کنورتر مثل یک کنورتر باک عمل می‌کند (شکل (۱۱a)). وقتی پخش توان در جهت معکوس باشد، کنورتر به عنوان یک کنورتر بوست عمل می‌کند (شکل (۱۱b)). در هر یک از مدهای کاری، یک سویچ و دیود موازی معکوس در دو سر سویچ دیگر عمل می‌کنند.



شکل ۱۰) کنورتر DC دوجتهه

1) Bidirectional Converter

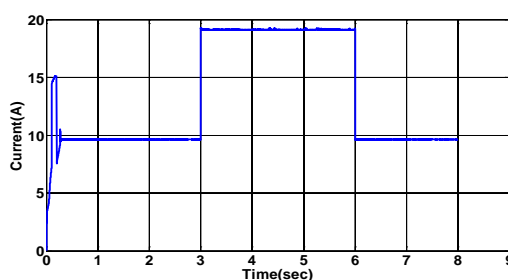


شکل (۱۱) مدل‌های توپولوژی کنورتر دو جهته. (a) مد ۱: باک-باتری (b) مد ۲: بوست-دشارژ باتری

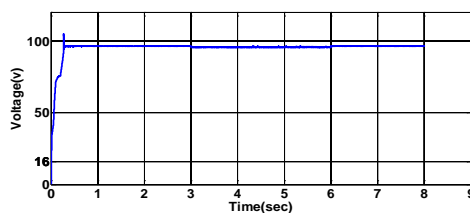
نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۲-۱۵) نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی از یک منبع جریان کنترل شده با جریان ثابت ۱۵ آمپر به عنوان منبع ورودی اصلی استفاده شده است و یک باتری سرب-اسید با ولتاژ نامی ۵۰ ولت، هم به عنوان منبع کمکی جهت تثبیت ولتاژ خروجی در مقدار ۱۰۰ ولت به کار رفته است [۵، ۶، ۱۰].

شکل (۱۲) جریان بار را نشان می‌دهد که تغییر پله‌ای در بار ایجاد شده است. شکل (۱۳) نشان می‌دهد با وجود ایجاد یک تغییر پله‌ای در بار سیستم توانسته ولتاژ خروجی را در مقدار ۱۰۰ ولت ثابت نگاه داشته باشد.

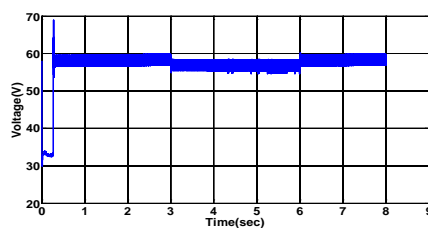


شکل (۱۲) جریان خروجی برای کنورتر دو جهته DC/DC

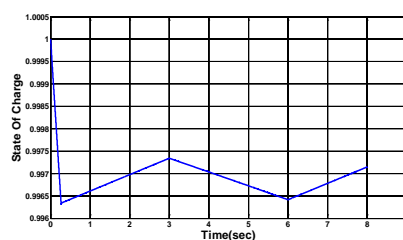


شکل (۱۳) ولتاژ خروجی برای کنورتر دو جهته DC/DC

شکل (۱۴) تغییرات ولتاژ باتری را با توجه به تغییرات جریان بار نشان می‌دهد. زمانی که جریان بار افزایش می‌یابد، ولتاژ باتری جهت تامین توان اضافی درخواستی بار کاهش می‌یابد به طوری که حالت شارژ باتری نیز کاهش می‌یابد که در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۴) ولتاژ باتری در سیستم شبیه سازی شده



شکل ۱۵) SOC باتری در سیستم شبیه سازی شده

نتیجه گیری

در این مقاله، اصول عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی پلیمری/ باتری سرب-اسید مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از بکارگیری راهبرد کنترلی تثبیت جریان دریافتی از پیل سوختی و حفظ حالت شارژ در محدوده مطمئن به منظور کاهش استرس ولتاژ بر روی باتری و استرس جریان لحظه ای بر روی پیل سوختی بوده است. این هدف با کنترل مبدل بوست و کنترل مبدل دو جهته تحقق یافته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که روش ارائه شده، سیستم را در همه مدهای عملکرد بخوبی کنترل می‌نماید. همچنین مشاهده گردید که مشارکت توان بین پیل سوختی پلیمری و باتری سرب-اسید در مواقع تغییر بار بخوبی صورت گرفته است و باتری به طور موفقیت آمیزی به عنوان منبع توان کمکی برای پیل سوختی عمل می‌نماید.

منابع

- [۱] سامان احمدی، سید محمد تقی بطحایی. (۱۳۹۳)، بهینه سازی راهبرد مدیریت انرژی در خودروی هیبریدی پیل سوختی، باتری و ابرخازن، جلد ۱۷ شماره ۴ - صفحه ۱۱۹-۱۳۶.

- [۲] حسن حسن زاده ، محمد علی فرزاد.. (۱۳۹۱)، امکان سنجی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم ترکیبی فتوولتائیک و پیل سوختی جهت تولید همزمان برق و حرارت در یک واحد مسکونی در شرق ایران، جلد ۱۴ شماره ۲ صفحات ۱۹-۴۱.
- [۳] سید مهدی رخت اعلا، ابوالفضل رنجبر، رضا قادری. (۱۳۸۸)، کنترل مد لغزشی مبدل DC-DC Bidirectional جهت کاربرد در پیل سوختی، نخستین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران.
- [4] Amirabadi, M., Farhangi, Sh. May 2006. "Fuzzy Control of Hybrid Fuel Cell / Battery Power Source in Electric Vehicle", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 1-5, 24-26, Singapore.
- [5] Caisheng, W., Nehrir, H., July 2006. "Modeling and control of hybrid wind/ photovoltaic/fuel cell distributed generation", PhD. Thesis, Montana state.
- [6] Correa, J., Farret, F. A., Gomes, J. R., Simoes, M. G. July 2003. "Simulation of Fuel-Cell Stacks using a Computer-Controlled Power Rectifier With the Purposes of Actual High-Power Injection Application", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 1136-1142.
- [7] Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M. 2009. "A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system", *Journal of Power Sources*, vol. 194, pp. 369-380.
- [8] *Handbook of Batteries* (1995), 2nd edition, D. Linden, Ed., McGraw Hill, Inc., New York.
- [9] Jantharamin N., Zhang, L. April 2008. "A new dynamic model for lead-acid batteries", *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 86-90.
- [10] Kisacikoglu, M.C., Uzunoglu, M., Alama, M.S. 2009. "Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultra capacitor hybrid vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, Issue 3, pp. 1497-1507.
- [11] Larminie, J. and Dicks, A. (2000) "Fuel Cell Systems Explained", 1 ed. New York: Wiley, pp. 29-52.
- [12] Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins W.P., (2003) *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, New York: Wiley.
- [13] Salameh, Z.M., Casacca, M.A. and Lynch, W.A. 1992. "A mathematical model for lead-acid batteries", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, No. 1, pp. 93-98.
- [14] Sakhare, A., Davari, A., Feliachi, A. 2004. "Fuzzy logic control of fuel cell for stand-alone and grid connection", *Journal of Power Sources*, vol. 135, pp. 165-176.
- [15] Thring, R. H. (2004), "Fuel Cells for Automotive Applications", New York: American Society of Mechanical Engineers Press.
- [16] Wang C., Nehrir M.H., Gao H., "Control of PEM fuel cell distributed generation systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, Issue 2, pp. 586-595, June 2006.