

مدیریت هوشمند توان در سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی/ذخیره‌ساز انرژی

امین حاجی زاده^۱ و فتاح حسن زاده^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شاهرود- شاهرود- ایران

aminhajizadeh@shahroodut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شاهرود - شاهرود- ایران

fatahhasanzadeh1@gmail.com

چکیده: در این مقاله مدیریت هوشمند توان در سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی توسط کنترل کننده هوشمند صورت می‌گیرد. توربین بادی مورد استفاده در این سیستم دارای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم است. سیستم مورد نظر به صورت تولید پراکنده و جدا از شبکه در نظر گرفته شده است. در این سیستم توربین بادی به عنوان منبع تولید اصلی و پیل سوختی به همراه ذخیره ساز انرژی به عنوان منابع پشتیبان هستند. مهمترین اهداف کنترلی مورد نظر در این مقاله تامین بار توسط منابع تولید توان به طور کامل و عدم تداخل در عملکرد منابع پشتیبان و همچنین بهره‌برداری بهینه از سیستم است. منظور از عدم تداخل عملکرد بین منابع پشتیبان، عملکرد آنها به صورت مکمل یکدیگر است؛ یعنی تولید توان پیل سوختی و استفاده از ذخیره ساز انرژی به گونه‌ای باشد که در هر لحظه بهره برداری بهینه از این سیستم صورت گیرد و پیل سوختی بیش از اندازه مورد نیاز توان تولید نکند. کنترل کننده مورد استفاده در این سیستم کنترل کننده فازی است. شبیه سازی در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK صورت گرفته، سیستم در حالت‌های مختلف عملکردی بررسی می‌شود.

واژه های کلیدی: توربین بادی PMSG، سیستم تولید توان ترکیبی، کنترل کننده فازی، مدیریت هوشمند توان

۱- مقدمه

گرمایی و غیره اشاره نمود. استفاده از منابع تجدیدپذیر علاوه بر آثار زیست - محیطی مطلوب خود، از نظر اقتصادی نیز به صرفه هستند. برای پیاده سازی و تحقیق بر روی یک سیستم تولید پراکنده و بویژه سیستم‌های تولید توان ترکیبی شامل منابع تجدیدپذیر انرژی، قبل از هر چیز به تعیین اندازه مناسب منابع و المان‌های به کار رفته در آن نیاز است. این امر باعث افزایش بهره‌وری سیستم مورد نظر و جلوگیری از استفاده نامناسب از اجزای به کار رفته می‌شود [۱] و [۲].

آنچه در بهره‌برداری از سیستم‌ها مورد مهم است، بهره‌برداری بهینه و مناسب از سیستم‌هاست. این مقاله به بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر توسط کنترل هوشمند منابع موجود می‌پردازد. در این سیستم توربین بادی به عنوان منبع اصلی تامین کننده بار در نظر گرفته شده است.

با گسترش روزافزون جوامع انسانی و توسعه صنعتی جوامع مختلف، به منابع انرژی در حال افزایش نیاز است. از سوی دیگر، منابع فسیلی در جهان رو به اتمام هستند و این منابع، از نظر اندازه و مقدار محدود بوده، آلاینده محیط زیست نیز محسوب می‌شوند. از این رو، در سال‌های گذشته، گرایش به استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی رو به فزونی گذاشته است. از جمله این منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان به خورشید، باد، پیل‌های سوختی، انرژی زمین

۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۰۸/۰۸

نام نویسنده مسئول : امین حاجی زاده

نشانی نویسنده مسئول : ایران - شاهرود - بلوار دانشگاه، دانشگاه شاهرود، دانشکده مهندسی برق.

منبع اصلی تولید توان مورد نیاز بار است. همچنین سیستم باتری و اینورتر برای تامین مقدار مشخص توان در صورت نیاز طراحی شده است. در این مرجع هدف گرفتن بیشترین توان ممکن از باد است. بیشترین توان تولیدی زمانی حاصل می‌شود که توربین تحت شرایط C_p بهینه عمل نماید.

در این مقاله، هدف طراحی استراتژی کنترلی و کنترل کننده مناسب برای سیستم ترکیبی بادی/پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی با هدف بهره‌برداری بهینه از سیستم و همچنین، پوشش و از بین بردن نارسایی‌های موجود در موارد فوق است.

ادامه مقاله به صورت زیر است: در بخش دوم مدل‌سازی سیستم بررسی می‌شود. سپس در بخش سوم استراتژی کنترل مدیریت توان ارائه شده و در بخش چهارم کنترل کننده سیستم تشریح شده است. در بخش پنجم نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و بخش ششم نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- مدل‌سازی سیستم

۲-۱- توربین بادی

توان تولیدی توربین بادی و رابطه آن با سرعت باد با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۶] و [۷]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p (\beta, \lambda) V_w^3 \quad (1)$$

$$\lambda = R W_m / V_m \quad (2)$$

در این معادلات ρ نشان دهنده چگالی باد، A مساحت جاروب شده توسط پره‌ها، V_m سرعت باد و C_p ضریب بهره‌وری (که بستگی به طراحی توربین دارد)، β زاویه‌ی پره‌ها، λ نرخ سرعت، R شعاع پره‌ها و W_m سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب rad/sec است.

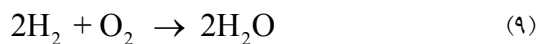
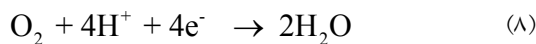
منحنی آیرودینامیکی توربین بادی نیز در شکل ۱ دیده می‌شود. این منحنی نشان دهنده نحوه ردیابی ماکزیمم توان تولیدی توربین بادی است. با استفاده از این منحنی ردیابی ماکزیمم توان توربین صورت گرفته است.

همچنین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی به عنوان منابع پشتیبان در این سیستم هستند. از آنجا که اغلب هزینه‌های بهره‌برداری از این سیستم مربوط به هزینه سوخت پیل سوختی است، با کنترل توان تولیدی پیل سوختی در این سیستم می‌توان به بهره‌برداری بهینه و اقتصادی از سیستم پرداخت.

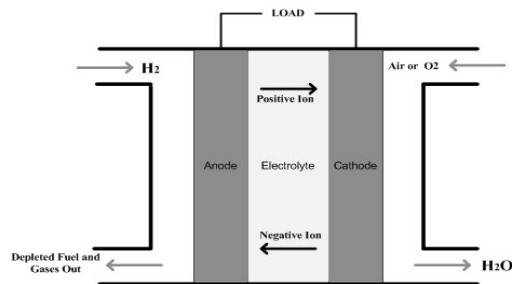
در راستای مدیریت توان در سیستم‌های مشابه مطالعاتی صورت گرفته که برخی از آنها به شرح ذیل است:

در [۳] از توان توربین بادی برای تغذیه الکترولایزر و بار استفاده شده است. هرگاه توان تولیدی توسط توربین بادی کمتر از توان مورد نیاز بار باشد، آنگاه پیل سوختی (FC) با مصرف هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر شروع به تولید توان الکتریکی نموده، بار را تغذیه می‌کند. در صورتی که این دو قادر به تامین بار نباشند، مازاد توان مورد نیاز بار توسط ابرخازن (UC) تامین می‌شود. نقش UC در این سیستم پوشش دینامیک کند FC در زمان‌های تغییر توان تولیدی FC و همچنین تامین بار در صورت نیاز است. ایراد این استراتژی در این است که برای زمانی که توان تولیدی توربین بیش از توان مورد نیاز بار و الکترولایزر باشد، راهکاری در نظر گرفته نشده است. همچنین، کنترلی بر روی سطح شارژ UC ها (SOC) صورت نگرفته است. در [۴] از توربین بادی برای تغذیه بار و الکترولایزر استفاده شده است. در این استراتژی تا زمانی که فشار تانک ذخیره‌ساز هیدروژن به میزان مورد نظر نرسیده باشد، الکترولایزر همچنان به تولید هیدروژن ادامه می‌دهد. در غیر این صورت، دیگر توانی به الکترولایزر انتقال نمی‌یابد. مهمترین ایراد این سیستم عدم سایزینگ مناسب اجزای سیستم است. در این سیستم توربین بادی به کار رفته دارای ظرفیت بسیار پایینی نسبت به بار است که بنابراین بیشتر بار توسط پیل سوختی تامین می‌گردد. همین امر می‌تواند باعث افزایش بیش از حد هزینه بهره‌برداری از سیستم در طول عمر پروژه گردد؛ که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همچنین، زمانی که به افزایش توان پیل نیاز باشد، پیل سوختی به اندازه ظرفیت نامی خود شروع به تولید می‌کند؛ در حالی که نیاز به تولید توان تا این مقدار نیست. در [۵] سیستم DFIGN به عنوان

شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۱۰، ۱۱]. از پیل سوختی می‌توان برای تامین بارهای محلی و یا به صورت اتصال به شبکه بهره‌برداری نمود. از جمله مسائل مربوط به پیل‌های سوختی، دینامیک کند این سیستم‌ها در زمان راه‌اندازی و لحظه تغییر توان خروجی (بر اثر تغییر تقاضا) است. همین امر نیاز به استفاده از سیستم پشتیبان از جمله ذخیره ساز انرژی را ضروری می‌کند [۱۰، ۱۱]. واکنش‌های صورت گرفته در آند، کاتد و ماحصل نهایی به صورت روابط زیر هستند [۱۱]:



شکل (۲) نشان دهنده عملکرد پیل سوختی است. در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی مربوط به پیل سوختی براساس مرجع [۱۱، ۱۲] انجام شده است.

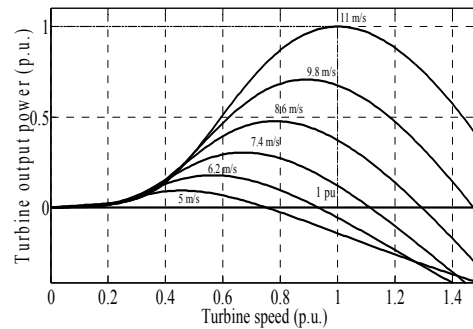


شکل (۲): عملکرد پیل سوختی

۲-۴- ذخیره ساز انرژی (باتری‌ها)

از ذخیره ساز انرژی، با توجه به چگالی بالای انرژی آنها در هنگام شارژ و دشارژ، برای پوشش دینامیک کند پیل سوختی استفاده می‌شود. همچنین، برای ذخیره مازاد توان تولیدی سیستم مورد نظر توسط توربین بادی و پیل سوختی، و نیز برای استفاده از انرژی ذخیره شده در آنها برای جبران کمبود توان مورد نیاز بار می‌توان از باتری‌ها استفاده کرد [۴]. در فرمول (۱۰) رابطه سطح شارژ باتری‌ها نشان داده شده است.

$$SOC = \frac{Q_0 \pm \int i_{battery} dt}{Q_n} \quad (۱۰)$$



شکل (۱): منحنی آیرودینامیکی توربین بادی

۲-۲- مدل ژنراتور

مدل دینامیکی PMSG در قاب مرجع dq0 به صورت معادله (۳) است [۸] و [۹]:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در معادله (۳)، R_s مقاومت سیم‌پیچی استاتور، ω_e سرعت زاویه‌ای الکتریکی ژنراتور و v_{sd} ، v_{sq} ، i_{sd} ، i_{sq} و ψ_{sd} و ψ_{sq} به ترتیب ولتاژ، جریان و شار استاتور در قاب مرجع dq0 هستند. در صورتی که محور d در راستای شار روتور قرار بگیرد، شارهای پراکندگی استاتور به صورت زیر هستند:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{dm} & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{qm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که L_{ls} اندوکتانس پراکندگی سیم‌پیچ استاتور، L_{dm} و L_{qm} به ترتیب اندوکتانس متقابل محور d و q استاتور و روتور، ψ_f شار پراکندگی تولیدی توسط آهنرباها هستند.

همچنین، گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با [۹]:

$$\begin{aligned} \tau_m &= p(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \\ &= p(\psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \end{aligned} \quad (۵)$$

که $L_q = L_{ls} + L_{qm}$ و $L_d = L_{ls} + L_{dm}$ هستند.

معادله (۳) در حالت ماندگار به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (۶)$$

۲-۳- پیل سوختی

پیل سوختی وسیله‌ای است که به طور مستقیم انرژی

راه‌اندازی پیل سوختی همراه با ثابت زمانی بالایی بوده و دارای دینامیک کندی برای رسیدن به حالت عملکرد پایدار است. بنابراین، برای جلوگیری از کاهش طول عمر پیل-سوختی و رفع اثرات دینامیک کند آن در زمان راه‌اندازی که باعث نارسایی‌هایی در تعادل توان بین تولید و مصرف می‌شود، همواره پیل را در حالت کار نگه می‌داریم. همین امر باعث افزایش قابلیت اطمینان در سیستم ترکیبی فوق در عدم از دست دادن بخشی از بار در زمان نیاز به توان پیل سوختی می‌شود [۱۳].

روش کنترل پیل سوختی برای دستیابی به اهداف فوق بدین صورت است که در زمانی که توان توربین بادی پاسخگوی توان مورد نیاز بار و یا بیش از توان مورد نیاز بار باشد، پیل در حال کار بوده و در این حالت توان تولیدی پیل سوختی در میزان مشخص و پایینی تنظیم می‌شود و از خاموش شدن آن جلوگیری می‌کنیم. اکنون مازاد توان تولیدی توسط توربین بادی و پیل سوختی در ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌شود و در مواقع ضروری از انرژی ذخیره شده در باتری‌ها استفاده می‌کنیم.

می‌توان با توجه به توان تولیدی توربین بادی و خروجی کنترل کننده که تعیین کننده میزان مرجع توان تولیدی پیل سوختی است، شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها را کنترل نمود. بدین منظور، توان تولیدی توربین بادی و توان تولیدی پیل سوختی را با یکدیگر جمع می‌کنیم و از مقدار توان مورد نیاز بار (P_{Load}) کم می‌کنیم (ΔP). حاصل این عبارت نشان دهنده نحوه عملکرد باتری‌ها در شارژ و یا دشارژ شدن آنهاست. در صورتی که ΔP مثبت باشد، نشان دهنده این است که این مقدار توان باید توسط ذخیره ساز انرژی جذب شود که به معنای شارژ شدن باتری‌هاست؛ و در صورتی که ΔP منفی باشد، این مقدار توان باید توسط ذخیره ساز انرژی برای پوشش توان مورد نیاز بار تامین شود و به اصطلاح باتری‌ها در حالت دشارژ قرار می‌گیرند. روابط (۳۱) و (۱۴) نشان دهنده این موضوع هستند.

$$P_{gen} = P_{WT} + P_{FC} \quad (13)$$

$$\Delta P = P_{gen} - P_{Load} \quad (14)$$

در رابطه (۱۳) و (۱۴)، نشان دهنده توان تولیدی

در این فرمول Q_0 سطح شارژ اولیه، Q_n ظرفیت باتری‌ها و i جریان باتری و SOC سطح شارژ باتری است. روابط (۱۱) و (۱۲) به ترتیب شارژ و دشارژ باتری‌ها را مدل می‌نمایند.

$$f_1(i^{**}, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{0.1Q + i^{**}} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^{**} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (11)$$

$$f_2(i^{**}, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^{**} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (12)$$

در این معادلات E_0 ولتاژ ثابت باتری (ولت)، $Exp(s)$ دینامیک نمایی باتری (ولت)، $Sel(s)$ نشان دهنده حالت باتری است که برابر ۱ در زمان شارژ باتری و ۰ در زمان دشارژ باتری، K مقاومت متقابل (اهم)، i^* دینامیک جریان فرکانس پایین (آمپر)، i^{**} ظرفیت خارج شده (آمپر ساعت)، i جریان باتری (آمپر) و Q ماکزیمم ظرفیت باتری هستند.

۳- استراتژی کنترل مدیریت توان

طراحی یک استراتژی کنترلی مناسب برای هر سیستمی، مهمترین بخش مطالعات صورت گرفته بر روی آن سیستم است. همواره هدف از کنترل هر سیستمی در راستای بهره‌برداری مناسب و اقتصادی از آن است. بنابراین، در طراحی کنترل کننده، باید تا حد امکان تمام مواردی را که باعث بهبود عملکرد سیستم مورد مطالعه می‌شود، در نظر گرفت و به درستی بر روی سیستم اعمال نمود. در این بخش ارائه یک استراتژی کنترلی با هدف مدیریت توان و بهره‌برداری مناسب از سیستم مورد نظر بررسی می‌شود.

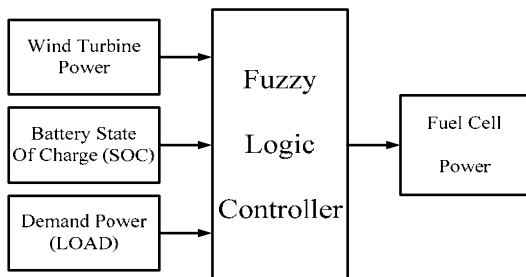
در این سیستم عامل اصلی برای کنترل منابع انرژی، توان تولیدی توربین بادی و میزان بار است؛ بدین صورت که زمانی که توان تولیدی توربین بادی بیش از توان مورد نیاز بار باشد، مازاد توان بادی در ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌شود و زمانی که توان تولیدی توربین بادی قادر به پوشش کامل بار نباشد، از پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی برای پوشش نارسایی توان استفاده می‌کنیم.

در مورد پیل‌های سوختی گفتی است که راه‌اندازی پی در پی آنها باعث کاهش طول عمرشان می‌شود. همچنین،

توان و در نتیجه کاهش میزان سوخت مصرفی پیل سوختی، هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت برای تولید توان توسط پیل سوختی کاهش چشمگیری می‌یابد [۱۵، ۱۶].

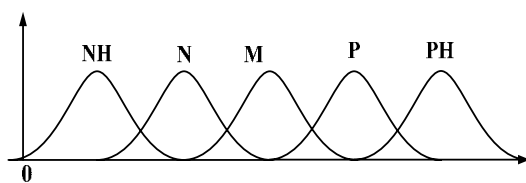
۴- کنترل کننده سیستم

در این مقاله از کنترل کننده فازی برای کنترل مدیریت بهینه توان استفاده شده است. کنترل کننده فازی قادر است علاوه بر عملکرد در شرایط تعیین شده برای کنترل کننده، در حالت‌های مابین نیز تصمیم مناسب را اتخاذ و سیستم را کنترل کند. کنترل فازی مورد استفاده در این مقاله از نوع مدانی بوده و گروه‌های فازی مورد استفاده برای تعیین قوانین کنترل کننده‌ها از نوع تابع گوسین است. برای هر یک از ورودی‌ها و خروجی مورد نظر، قوانین مورد نیاز را تعیین و به کنترل کننده اعمال می‌کنیم. شکل ۳ نشان دهنده بلوک دیگرام کنترل فازی اعمال شده بر سیستم مورد مطالعه است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مرجع توان تولیدی پیل سوختی به عنوان خروجی کنترل کننده است.



شکل (۳): فلوچارت کنترل فازی

هر یک ورودی‌های سیستم و خروجی به پنج بازه تقسیم شده‌اند. در شکل ۴ نمونه‌ای از ورودی (خروجی) مشاهده می‌شود.



شکل (۴): نمونه‌ای از گروه‌های فازی مورد استفاده

قوانین در پنج حالت از سطح بار و مطابق جدول‌های

توربین بادی، P_{FC} توان تولیدی پیل سوختی و P_{Load} توان مورد نیاز بار هستند.

در نهایت، توان باتری‌ها به همراه توان‌های تولیدی توربین بادی و پیل سوختی باید با توان مورد نیاز بار تطابق داشته و کل بار به طور کامل پوشش داده شود (رابطه (۱۵)).

$$P_{WT} + P_{FC} + P_{Batt} = P_{Load} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، P_{Batt} نشان دهنده توان جذب شده و یا توان ارائه شده توسط باتری‌هاست.

نکته دیگری که باید در طراحی قوانین کنترلی برای این سیستم در نظر گرفت و از درجه اهمیت بالایی برخوردار است، دقت در عدم تداخل عملکرد ذخیره ساز انرژی و پیل سوختی است. منظور این است که قوانین لازم برای نحوه عملکرد پیل سوختی باید به گونه‌ای اتخاذ گردد که پیل سوختی در هر لحظه به اندازه مورد نیاز و در راستای عملکرد بهینه سیستم، توان تولید کند؛ بدین مفهوم که عملکرد پیل و ذخیره ساز انرژی مکمل یکدیگر باشند؛ یعنی زمانی که باتری‌ها در سطح مطلوبی از میزان انرژی ذخیره شده در خود قرار دارند و بر اثر بیشتر بودن توان تولیدی توربین نسبت به تقاضا در حال شارژ شدن هستند، در این لحظه با توجه به اینکه تقاضا توسط توان تولیدی توربین بادی پوشش داده می‌شود، توان تولیدی پیل سوختی باید کاهش یابد تا سوخت کمتری مصرف شود. و زمانی که باتری‌ها بر اثر کمبود توان تولیدی توربین نسبت به میزان تقاضا در حال دشارژ شدن هستند، در این لحظه پیل سوختی باید تا حد امکان توان تولیدی خود را افزایش دهد تا از تخلیه شدن بیش از حد باتری‌ها جلوگیری شود. البته، در این مورد، باید به سطح شارژ باتری‌ها (SOC) نیز توجه شود.

از آنجا که شارژ و دشارژ شدن متوالی و بیش از اندازه باتری‌ها باعث کاهش طول عمر آنها می‌شود [۱۳، ۱۴]، با اعمال موارد فوق می‌توان به افزایش طول عمر باتری‌ها کمک کرده و همچنین از نظر اقتصادی نیز سیستم در حالت بهینه بهره‌برداری شود؛ بدین صورت که با عملکرد بهینه پیل سوختی و جلوگیری از تولید بیش از میزان مورد نیاز

جدول (۵): قوانین فازی برای حالت پنجم

SOC PWIND	NH	N	M	PH	H
NH	H	H	H	H	H
N	H	H	H	H	H
M	H	H	H	H	H
PH	H	PH	M	N	NH
H	N	NH	NH	NH	NH

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم و اعمال کنترل کننده، تحت شرایط عملکردی مختلف بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی، کارآمد بودن کنترل کننده اعمال شده بر روی سیستم مورد نظر، بررسی می‌گردد. انواع حالت‌های مورد بررسی به شرح ذیل است:

(الف) سرعت باد ثابت- بار متغیر

(ب) سرعت باد متغیر- بار ثابت

(ج) سرعت باد متغیر- بار متغیر

۵-۱- حالت اول: سرعت باد ثابت- بار متغیر

در این حالت سرعت باد، ثابت در نظر گرفته می‌شود. توان تولیدی توربین بادی نیز مطابق شکل ۵ ثابت است. سطح شارژ اولیه باتری‌ها ۷۰٪ در نظر گرفته شده است. بار متصل به سیستم در این حالت متغیر و مطابق شکل (۶) است.

با مقایسه شکل (۵) و شکل (۶) مشاهده می‌شود که در بازه‌های زمانی مختلفی توان تولیدی توربین بادی قادر به تامین تقاضای بار نیست. بنابراین، در این زمان‌ها باید پیل سوختی و باتری‌ها با پوشش مناسب مانع از دست دادن بار و یا بخشی از آن شوند. این پوشش باید به گونه‌ای باشد که پیل سوختی با عملکرد مناسب خود در هر لحظه به میزان مورد نیاز توان تولید کند و از تولید توان اضافی خودداری کند. البته، با توجه به دینامیک کند پیل سوختی در هنگام راه‌اندازی، همواره پیل را در حال کار نگه می‌داریم و مقدار توان تولیدی آن در این لحظات حدود ۸ کیلووات است. بنابراین، در برخی زمان‌ها که نیاز به توان پیل سوختی نداریم، توان تولیدی پیل به همراه مازاد توان تولیدی توربین بادی در باتری‌ها ذخیره می‌شوند.

(۱) تا (۵) هستند. این قوانین با توجه به عملکرد سیستم طی مراحل مختلف و قوانین مختلف به دست آمده و مطابق نتایج حاصل شده، بهترین عملکرد را برای کنترل کننده نشان می‌دهند.

حالت اول: سطح بار خیلی کم (LOAD=NH)، مطابق

جدول (۱) است.

جدول (۱): قوانین فازی برای حالت اول

SOC PWIND	NH	N	M	PH	H
NH	H	PH	M	N	NH
N	NH	NH	NH	NH	NH
M	NH	NH	NH	NH	NH
PH	NH	NH	NH	NH	NH
H	NH	NH	NH	NH	NH

حالت دوم: سطح بار کم (LOAD=N)، مطابق جدول

(۲) می‌باشد.

جدول (۲): قوانین فازی برای حالت دوم

SOC PWIND	NH	N	M	PH	H
NH	PH	M	N	NH	NH
N	NH	NH	NH	NH	NH
M	NH	NH	NH	NH	NH
PH	NH	NH	NH	NH	NH
H	NH	NH	NH	NH	NH

حالت سوم: سطح بار متوسط (LOAD=M)، مطابق

جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): قوانین فازی برای حالت سوم

SOC PWIND	NH	N	M	PH	H
NH	H	H	H	H	PH
N	PH	PH	M	N	NH
M	NH	NH	NH	NH	NH
PH	NH	NH	NH	NH	NH
H	NH	NH	NH	NH	NH

حالت چهارم: سطح بار زیاد (LOAD=PH)، مطابق

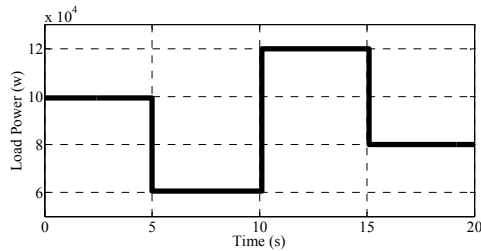
جدول (۴) است.

جدول (۴): قوانین فازی برای حالت چهارم

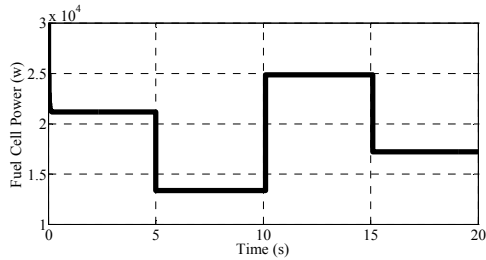
SOC PWIND	NH	N	M	PH	H
NH	H	H	H	H	H
N	H	H	PH	PH	PH
M	PH	PH	M	M	N
PH	N	NH	NH	NH	NH
H	NH	NH	NH	NH	NH

حالت پنجم: سطح بار خیلی زیاد (LOAD=H)، مطابق

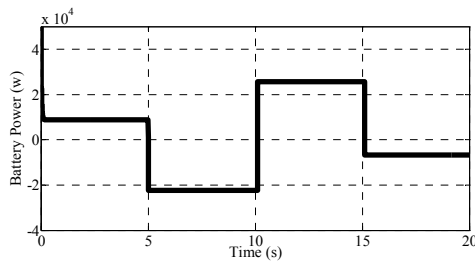
جدول (۵) است.



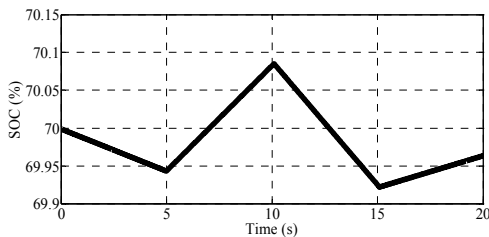
شکل (۶): بار الکتریکی



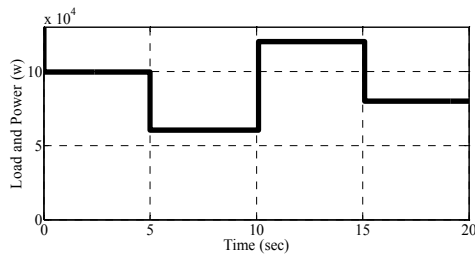
شکل (۷): توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل-کننده)



شکل (۸): توان ذخیره ساز انرژی



شکل (۹): سطح شارژ باتری‌ها (SOC)

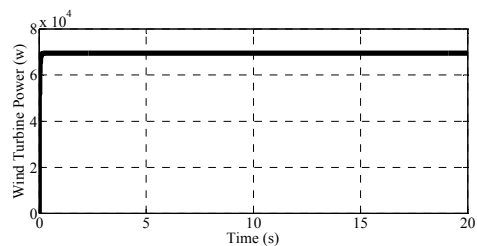


شکل (۱۰): تطابق توان تولیدی و بار

شکل (۷) نشان دهنده توان تولیدی پیل سوختی یا همان خروجی کنترل کننده و شکل ۸ نشان دهنده توان باتری‌ها است. در شکل ۸ در زمان‌هایی که توان منفی است نشان دهنده جذب توان مازاد تولیدی توسط توربین و پیل و یا همان حالت شارژ است و زمانی که توان مثبت است نشان دهنده تزریق توان به بار و یا همان دشارژ باتری‌ها می‌شود. همچنین، شکل (۹) نشان دهنده سطح شارژ باتری‌ها است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که عملکرد سیستم به گونه‌ای بوده که همواره در راستای حفظ سطح مناسب شارژ باتری‌ها نیز بوده است.

با توجه به شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود که باتری‌ها و پیل سوختی مکمل یکدیگر بوده، تداخل در عملکرد بین آنها مشاهده نمی‌شود. برای مثال، در زمان ۰ تا ۵ ثانیه که بار بیش از توان تولیدی توربین است، هم باتری و هم پیل سوختی برای جبران کمبود توان به کمک توربین بادی می‌آیند و در بازه ۵ تا ۱۰ ثانیه که بار کاهش می‌یابد، توان تولیدی پیل کاهش چشمگیری داشته، در این لحظه توان مازاد توسط باتری‌ها جذب می‌شود. همچنین، در بازه ۱۰ تا ۱۵ ثانیه که بار دوباره افزایش می‌یابد، جبران کمبود توان تنها بر عهده پیل نبوده، باتری نیز با توجه به SOC خود به کمک سیستم برای جبران کمبود بار می‌آید. همین عامل باعث کاهش سوخت مصرفی پیل شده، صرفه اقتصادی بهره‌برداری از سیستم را افزایش می‌دهد.

اما آنچه در کنترل سیستم مورد نظر مهم است، تطابق توان تولیدی توسط منابع انرژی با بار الکتریکی مورد تقاضا در سیستم است. این مطابقت باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان هیچ قسمتی از بار از دست نرود و تمام بار به طور کامل تامین شود. شکل ۱۰ نشان دهنده بار و توان تولیدی سیستم است. همان طور که مشاهده می‌شود، تمام بار به طور کامل پوشش داده شده است.



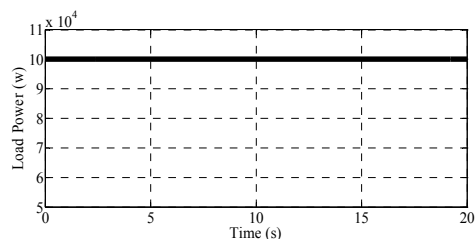
شکل (۵): توان تولیدی توربین بادی

۵-۲- حالت دوم: سرعت باد متغیر-بار ثابت

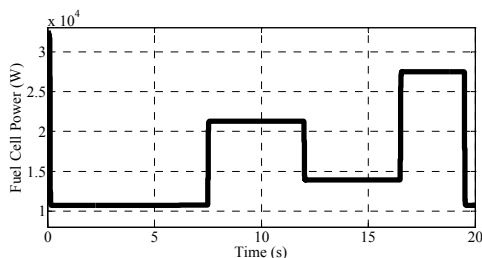
در این حالت سرعت باد را متغیر در نظر می‌گیریم. بنابراین، توان تولیدی توربین بادی نیز با توجه به سرعت باد مطابق شکل ۱۱ خواهد بود. همچنین، برای بار الکتریکی در این حالت مقدار ثابت و برابر با ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

با توجه به عدم تطابق بین توان تولیدی توربین و بار الکتریکی، از سیستم پشتیبان که شامل پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی است، برای برقراری تعادل بین بار و توان تولیدی استفاده می‌شود.

در شکل ۱۳ توان تولیدی پیل سوختی و در شکل ۱۴ توان ذخیره‌ساز انرژی نشان داده شده است. مجموع این دو شکل برابر اختلاف بین بار و توان تولیدی توربین بادی در بازه‌های زمانی مختلف است. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، باز هم عدم تداخل در عملکرد این دو سیستم به وضوح مشاهده می‌شود. در بازه زمانی ۰ تا ۵ ثانیه توان توربین بیشتر از توان مورد تقاضای بار است و بنابراین، با توجه به SOC باتری‌ها، پیل سوختی در پایین‌ترین حد خود توان الکتریکی تولید می‌کند و سپس مجموع این توان و توان مازاد تولید شده توسط توربین در باتری‌ها ذخیره می‌شود. در بازه ۵ تا ۱۰ ثانیه، با توجه به اینکه بار از توان تولیدی توربین بادی بیشتر است، هم پیل سوختی و هم باتری در تامین کمبود توان مورد تقاضا مشارکت می‌کنند. همچنین، نحوه عملکرد سیستم به گونه‌ای است که توجه به سطح شارژ باتری‌ها در راستای نگه داشتن SOC در بازه مناسب شده است. در شکل ۱۵ سطح شارژ باتری‌ها نشان داده شده است.

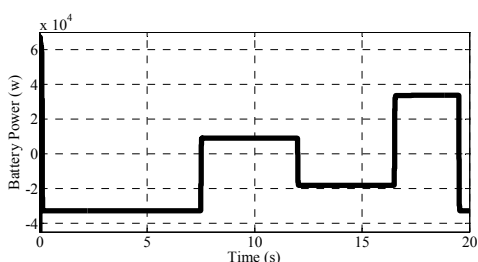


شکل (۱۲): بار الکتریکی

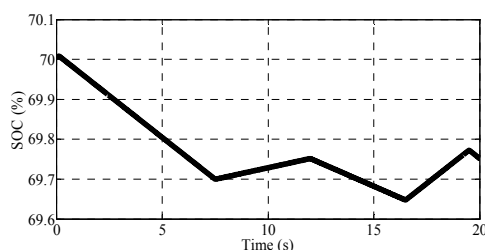


شکل (۱۳): توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی)

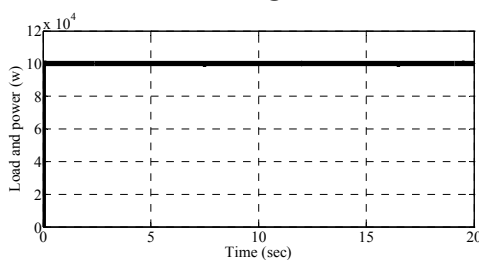
کنترل‌کننده



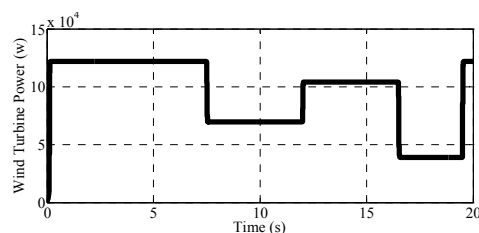
شکل (۱۴): توان ذخیره‌ساز انرژی



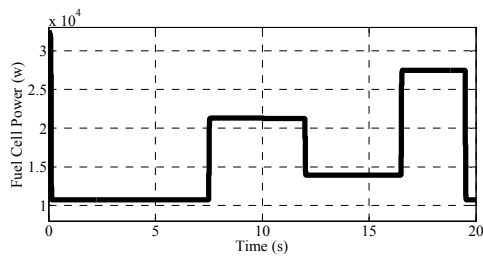
شکل (۱۵): سطح شارژ باتری‌ها (SOC)



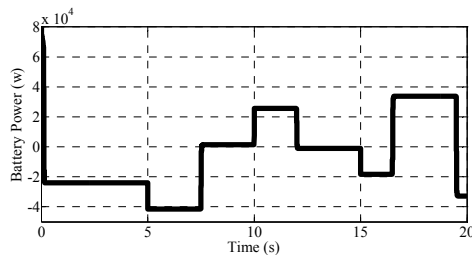
شکل (۱۶): مطابقت توان تولیدی و بار



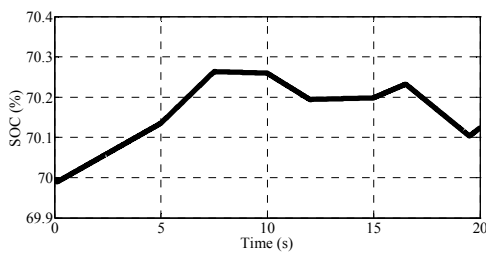
شکل (۱۱): توان تولیدی توربین بادی



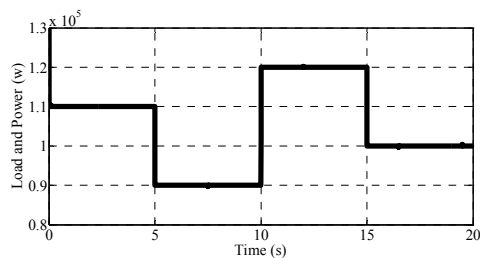
شکل (۱۹): توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل‌کننده)



شکل (۲۰): توان ذخیره ساز انرژی



شکل (۲۱): سطح شارژ باتری‌ها (SOC)



شکل (۲۲): مطابقت توان تولیدی و بار

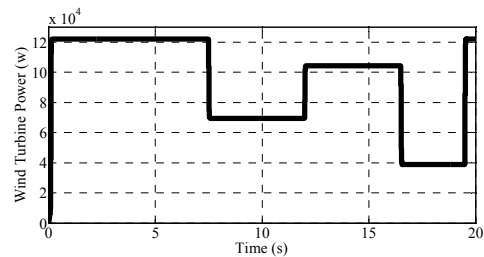
با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود که در بازه ۰ تا ۷٫۵ ثانیه توان تولیدی توربین بادی بیش از توان مورد نیاز بار است. بنابراین، در این بازه توان تولیدی پیل سوختی در کمترین مقدار ممکن است. این توان به همراه

شکل (۱۶) نیز نشان دهنده تطابق کامل بین توان تولیدی سیستم و بار الکتریکی است. مطابق این شکل در تمام لحظات بار الکتریکی بدون کوچکترین کمبود تامین شده است. بنابراین، با توجه به نتایج این قسمت مشاهده می‌شود که کنترل کننده تحت این شرایط نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد.

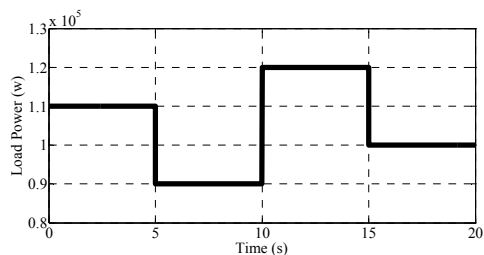
۵-۳- حالت سوم: سرعت باد متغیر-بار متغیر

در این حالت هم توان تولیدی توربین بادی، به علت متغیر بودن سرعت باد، مطابق شکل ۱۷ و هم بار الکتریکی مطابق شکل ۱۸ متغیر هستند. در این مورد تمامی حالات ممکن بررسی شده، به نوعی هر دو حالت اول و دوم را پوشش می‌دهد.

در این حالت پیل سوختی و باتری‌ها با تولید کمبود توان مورد نیاز بار (توسط پیل و باتری‌ها) و جذب مازاد توان (توسط باتری‌ها) به برقراری تعادل بین تولید و مصرف کمک می‌کنند. شکل (۱۹) و شکل (۲۰) به ترتیب توان پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی را نشان می‌دهند.



شکل (۱۷): توان تولیدی توربین بادی



شکل (۱۸): بار الکتریکی

توربین بادی- پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی بررسی شد. ابتدا استراتژی کنترلی مناسبی برای کنترل کننده فازی به کار رفته برای این سیستم تعیین شد. این استراتژی در مرحله اول با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع موجود در سیستم فوق صورت گرفته است. این بهره‌برداری به گونه‌ای صورت گرفته که در آن هر یک از منابع سیستم با یکدیگر تعامل داشته و با همکاری یکدیگر به تامین بار مورد نظر می‌پردازند. آنچه در این میان مهم است، عملکرد سیستم پشتیبان است که شامل پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی هستند. با توجه به نتایج شبیه سازی سیستم که در حالت‌های عملکردی مختلف بررسی شد، مشاهده می‌شود که در عملکرد این دو منبع تداخلی وجود ندارد. از مهمترین این اهداف علاوه بر مورد فوق که تعامل بین منابع است، تامین توان مورد نیاز سیستم و تطابق توان تولیدی سیستم با توان مورد تقاضاست. با بررسی نتایج حاصل مشاهده می‌شود که این مورد نیز به درستی و با دقت بسیار بالا صورت گرفته و در هیچ حالتی حتی بخش کوچکی از بار نیز از دست نرفته است.

ضمایم

جدول (۶): پارامترهای PMSG توربین بادی

پارامتر	مقدار	واحد
Sg (Generator rated power)	1500	KVA
F (frequency)	50	Hz
Vg (Generator rated voltage)	575	V
Rs (Stator resistance)	0.24	Ω
Mutual Inductance in d-axis, Ldm	0.0052	mH
Mutual Inductance in q-axis, Lqm	0.0052	mH
Permanent magnet flux	2.1669	V.s
C (dc link capacitor)	6800	μF
Rf (Grid filter resistance)	0.0001	Ω
Lf (Grid filter inductance)	1	mH

مازاد توان تولیدی توربین در درون باتری‌ها ذخیره می‌شود. در لحظه ۵ ثانیه، بار الکتریکی بر خلاف توان تولیدی توربین تغییر کرده، کاهش می‌یابد. در همین لحظه میزان توان مازاد تولیدی توسط توربین افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۲۰) در همین لحظه مقدار توان شارش یافته به باتری برای جذب افزایش یافته است. همچنین، در بازه ۷,۵ تا ۱۰ ثانیه، توان تولیدی توربین کمتر از بار الکتریکی است. بنابراین مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود که در این بازه توان تولیدی پیل سوختی به اندازه مناسب افزایش می‌یابد. این افزایش توان نه تنها به اندازه‌ای است که هیچ مقدار مازادی برای ذخیره شدن در باتری‌ها باقی نمی‌ماند، بلکه خود باتری‌ها نیز در این بازه به مقدار کمی در تامین بار مشارکت می‌نمایند. بنابراین، با توجه به توضیحات فوق مشاهده می‌شود که عملکرد پیل سوختی و باتری‌ها به طور مکمل با یکدیگر بوده، با سیستم تبادل توان می‌کنند. همین تعامل آثار بسیار مفیدی، از جمله افزایش طول عمر اجزا و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری را در بر دارد. یکی دیگر از مسائلی که باید بررسی شود، بحث SOC است. با دقت به شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که این فاکتور نیز به دقت مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۲۲ نشان دهنده مطابقت توان تولیدی سیستم و بار الکتریکی است.

با بررسی و دقت در نتایج این حالت، مشاهده می‌شود که سیستم مورد نظر توانایی پاسخ به انواع حالت‌های ممکن عملکردی را با دقت بالایی داراست. عملکرد سیستم به گونه‌ای است که در هر لحظه بهترین تصمیم را برای برقراری تعادل توان و بار و تعامل بین منابع پشتیبان می‌گیرد. حاصل این تصمیم‌گیری مناسب بهبود در بهره‌برداری از سیستم نسبت به روش‌های قبلی به کار گرفته شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم تولید توان پراکنده ترکیبی شامل

Power Extraction Capability" International Conference on Power System Technology

- [6] L. G. González¹, E. Figueres², G. Garcerá², O. Carranza, " Synchronization Techniques Comparison for Sensorless Control applied to PMSG," International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) , Valencia (Spain), 15th to 17th April, 2009.
- [7] S. A. Diaz, C. Silva, J. Juliet, H. A. Miranda, "Indirect Sensorless Speed Control of a PMSG for Wind Application," 978-1-4244-4252-2/09/\$25.00 ©2009 IEEE, pp1844-1850.
- [8] A. R. Bergen and V. Vittal, Power System Analysis, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000.
- [9] Sh. Li, T. A. Haskew, R. P. Swatloski, W. Gathings, "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 27, No. 5, MAY 2012.
- [10] A. Hajizadeh and M. Aliakbar Golkar, "Control of Hybrid Fuel Cell/Battery Distributed Power Generation System with Voltage Sag Ride-Through Capability" 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia
- [11] M. Uzunoglu, M.S. Alam, "Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone application" IEEE Transactions on Energy Conversion 2006; Vol.21, No.3, pp 767-775.
- [12] Alireza Alfi, Amin Hajizadeh, Hossin Gholizadeh, "PSO-Based Optimal State Feedback Control and Stability Analysis of DC-DC Boost Converter for Fuel Cell Power Generation Systems", Journal of Intelligent Systems in Electrical Engineering, Vol.3, No.1, pp.65-74, 2012.
- [13] M. Khalid & A.V. Savkin, (2010) "A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage", Renewable Energy, Vol 35, Issue 7, pp. 1520-1526
- [14] K. Sahay and B. Dwivedi, (2009) "Energy storage technology for performance enhancement of power systems," Electr. Power Qual. Util. Mag., Vol. 4, No.1, pp. 1-12.
- [15] Uzunoglu M, Alam MS. (2008) "Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a novel wavelet based load sharing algorithm". IEEE Transactions

جدول (۷): پارامترهای پیل سوختی

ولتاژ بی باری (استاندارد (v)	E_0	تعداد پیل‌های سری شده در یک پشته	N_0
دمای مطلق (T)	T	ثابت جهانی گازها (atm/kmol.K)	R
ثابت فارادی (C/kmol)	F	جریان پیل سوختی (A)	I_{FC}
ثابت مولار در پیچه آب (kmol/atm.s)	K_{H_2O}	ثابت مولار در پیچه هیدروژن (kmol/atm.s)	K_{H_2}
ضریب بهره وری	U	ثابت مولار در پیچه اکسیژن (kmol/atm.s)	K_{O_2}
فشار جزئی هیدروژن (atm)	P_{H_2}	ثابت مدلسازی (kmol/(s.A))	k_f
فشار جزئی اکسیژن (atm)	P_{O_2}	فشار جزئی آب (atm)	P_{H_2O}
فلوی اکسیژن (kmol/s)	q_{O_2}	فلوی هیدروژن (kmol/s)	q_{H_2}
ثابت زمانی هیدروژن (s)	T_{H_2}	مقاومت داخلی پیل سوختی (اهم)	R_{int}
ثابت زمانی آب (s)	T_{H_2O}	ثابت زمانی اکسیژن (s)	T_{O_2}

مراجع

- [1] M. Shakawat, Hossain, M. M Aruf Hossain, A.R.M Reazul Haque, "Optimization and Modeling of a Hybrid Energy System for off-grid Electrification", IEEE Int. Conf. 2011.
- [2] D. Debnath, A. Kumar, S. Ray, "Optimization and Modeling of PV/FC/Battery Hybrid Power Plant for Standalone Application", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 3, 2012
- [3] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam. (2006) "Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system" Journal of Power Sources 161, pp 707-722
- [4] M. Nayeripour, M. Hoseintabar, T. Niknam and J. Adabi. (2010) "Power management, dynamic modeling and control of wind/FC/battery-bank based hybrid power generation system for stand-alone application" Euro. Trans. Electr. Power 20 pp 1-22
- [5] Mendis N, Muttaqi K. M., Sayeef S., Perera S., (2010) "Autonomous Operation of Wind-Battery Hybrid Power System with Maximum

- on Energy Conversion; Vol.23, No.1, pp.263–272.
- [16] Khan MJ, Iqbal MT. (2005) “Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system”. *Journal of Renewable Energy*; 30(3).