

## طراحی کنترل‌کننده بهینه فیدبک حالت با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان و تحلیل

### پایداری در مبدل‌های DC-DC افزایش‌دهنده در سیستم‌های تولید توان پیل سوختی

علیرضا الفی<sup>۱</sup>، امین حاجی‌زاده<sup>۲</sup> و حسین قلی‌زاده<sup>۳</sup> نرم

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

a\_alfi@shahroodut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

aminhajizadeh@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

gholizade@shahroodut.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله طراحی استراتژی کنترل بهینه هوشمند ولتاژ و جریان برای مبدل‌های DC-DC افزایش‌دهنده در سیستم‌های تولید توان پیل سوختی با در نظر گرفتن مدل دقیق برای نقاط کار مختلف ارائه می‌شود. طراحی استراتژی کنترل پیشنهادی بر پایه روش فیدبک حالت پیاده‌سازی شده و کنترل‌پذیری سیستم مورد نظر و محدوده‌های پایداری آن بررسی می‌شود. همچنین، به منظور تعیین ضرایب بهینه فیدبک حالت و صفر نمودن خطای حالت ماندگار در سیگنال ولتاژ، در ساختار کنترلی از الگوریتم اجتماع پرندگان استفاده شده و نتایج در شرایط تغییر توان بار نیز ارائه می‌گردد. به منظور بررسی عملکرد استراتژی کنترل پیشنهادی، این کنترل‌کننده هم بر روی مدل میانگین و هم بر روی مدل دقیق مبدل پیاده‌سازی شده و نتایج مقایسه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل فیدبک حالت، مبدل DC-DC، پیل سوختی، الگوریتم اجتماع پرندگان، پایداری، کنترل‌پذیری.

## ۱- مقدمه

واحدهای تولید پراکنده تولید و یا در حالت منفصل از شبکه، تمامی توان بار را تامین کرد. در حالت‌های اتصال به شبکه باید براساس توان مصرفی از طرف بار، میزان توانی که از طرف شبکه و میزان توانی که باید توسط واحد تولید پراکنده تولید شود را به صورت صحیحی تعیین کرد. در بازارهای برق تجدید ساختار یافته معمولاً واحدهای برنامه‌ریزی در سیستم‌های قدرت سهم توان مربوط به شبکه را تعیین می‌کنند و براساس میزان توان تولید شده از طرف شبکه، میزان تولید توان واحد تولید پراکنده بایستی تعیین گردد. از این رو باید استراتژی کنترل مناسبی برای سیستم تولید پراکنده پیل سوختی طراحی گردد تا بتواند برای تامین توان بار درخواستی از طرف بار بین شبکه اصلی و سیستم تولید پراکنده هماهنگی‌های لازم را برآورده نماید. تا کنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی کنترل سیستم‌های تولید پراکنده پیل سوختی انجام شده است [۲-۴]. اکثر

نیروگاه‌های قدرت پیل سوختی با به وجود آمدن بحث تجدید ساختار در صنعت برق و رقابتی شدن بازار برق در آینده سهم بزرگی را در تولید توان خواهند داشت. پیل‌های سوختی، منابع ولتاژ dc هستند که از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند [۱]. یکی از دلایل اصلی برای به کارگیری منابع تولید پراکنده پیل سوختی در سیستم توزیع، تامین توان بار است. براساس برنامه‌ریزی‌های موجود در سیستم قدرت، می‌توان بخشی از توان بارهای مصرفی در حالت میکروشبکه را از طریق

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۲/۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۸/۶

نام نویسنده مسؤول : علیرضا الفی

نشانی نویسنده مسؤول : ایران - شاهرود - دانشگاه صنعتی

شاهرود - دانشکده برق و رباتیک

تحقیقات انجام شده روی کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت بوده و در بسیاری از مراجع بیشتر به بررسی پایداری گذرا و دینامیکی سیستم قدرت پرداخته شده است. از جمله در مرجع [۵] مدل سازی سیستم تولید پراکنده و طراحی کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرال گیر برای مبدل‌های DC/DC و DC/AC انجام شده است. در این مرجع از مدل‌های خطی شده حاصل حول یک نقطه کار، برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است. همچنین، در این مرجع فرض شده است که توان درخواستی از طرف بار تغییرات سریعی نداشته باشد. مبدل‌های DC-DC افزایشدهنده که به منظور اتصال منبع تولید توان پیل سوختی به شبکه در نظر گرفته می‌شوند، دارای ماهیت غیر خطی پیچیده‌ای هستند و با توجه به خاصیت نامینیم فازی که در تابع تبدیل ولتاژ نسبت به تغییرات سیکل وظیفه وجود دارد، هرگونه تغییرات در نقطه کار این مبدل باعث ناپایداری می‌گردد [۶]. همچنین، در اکثر تحقیقات انجام شده برای مبدل‌های DC-DC، طراحی کنترل‌کننده بر روی مدل‌های میانگین صورت پذیرفته و کنترل‌کننده طراحی شده بر روی مدل دقیق مبدل پیاده‌سازی نشده است [۷]، در حالی که برای یک مطالعه دقیق‌تر ضروری به نظر می‌رسد تا طراحی کنترل‌کننده به صورت دقیق براساس مفاهیم کنترل انجام گردد و سپس این کنترل‌کننده بر روی مدل دقیق مبدل پیاده سازی شود. با توجه به توضیحات فوق، هدف از ارائه این مقاله، به کارگیری مدل دقیق مبدل DC-DC افزایشدهنده برای سیستم‌های تولید توان پیل سوختی در نقاط کار مختلف و بهینه کردن ساختار کنترلی با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان است. الگوریتم‌های کلاسیک متنوع و فراوانی برای جستجوی فضای جواب‌ها و یافتن جواب بهینه طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک از روش‌های کلاسیک و سنتی موجود برای حل برخی مسائل بهینه‌سازی جواب خوبی پیدا می‌کنند، در حالی که در سایر مسائل دچار مشکل هستند. از این رو، روشن است که در مواجهه با یک مسئله جدید، باید راه حل جدیدی برای آن ارائه نمود.

دنیای واقعی که تعریف کامل مسأله و معادلات ریاضی آن را دست نمی‌باشد کارایی ندارند. علاوه بر این، در مواردی که به علت پیچیدگی مسأله، رسیدن به جواب با روش‌های سنتی غیرممکن و یا روند همگرایی الگوریتم‌های یاد شده کند باشد، مجبوریم جواب را تخمین بزنیم و به عبارتی از روش‌های تقریبی استفاده کنیم. از جمله روش‌های سنتی که جواب را به صورت تقریبی به دست می‌آورند، می‌توان به روش‌های گرادیانی اشاره کرد. این روش اقدام به جستجوی محلی می‌نماید. در یک الگوریتم تکرار، جواب در همسایگی یک نقطه اولیه بررسی و با یافتن جواب بهتر، جایگزین نقطه قبلی می‌گردد. در صورت پیدا نکردن جوابی بهتر در همسایگی جواب مرحله قبلی، الگوریتم متوقف می‌گردد. یک خطر مهم از دست دادن جواب واقعی با به دام افتادن در نقاط بهینه محلی است. اگر شعاع همسایگی را بزرگ انتخاب کنیم، امکان فرار از بهینه محلی بیشتر می‌شود، ولی این کار باعث کند شدن سرعت الگوریتم شده که غیرقابل قبول خواهد بود.

برای غلبه بر مشکلات روش‌های سنتی، روش‌های تجربی مدرن به وجود آمده‌اند که روش‌های تقریبی هستند و تمرکز عمده آنها در فرار از نقطه بهینه محلی و یافتن بهینه کلی است. مزیت این روش‌ها آن است که همه منظوره و قابل اعمال به طیف وسیعی از مسائل هستند. یکی از روش‌های مدرن روش‌های مبتنی بر جمعیت است. در روش‌های مبتنی بر جمعیت، اعضای جمعیت که به آنها ذرات نیز اطلاق می‌شود، هر یک جواب بالقوه مسأله است که با همکاری همدیگر نقطه بهینه را جستجو می‌کنند، در حالی که در روش‌های مبتنی بر جواب واحد، یک نقطه تصادفی در فضای جستجو به عنوان جواب اولیه مسأله انتخاب می‌شود و در یک الگوریتم تکرار، با در نظر گرفتن معیار جواب بهینه، به سمت این نقطه سوق داده می‌شود. یکی از روش‌های شناخته شده در این حوزه، اجتماع پرندگان نام دارد که به اختصار نامیده می‌شود. در این مقاله از الگوریتم PSO به منظور به دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی استفاده می‌شود. بنابر دانسته‌های نویسندگان، اجرای این الگوریتم در استراتژی کنترل پیشنهادی روی سیستم تولید توان پیل سوختی تا کنون انجام نشده است.

برای مثال، این سیستم باید قادر باشد تا مقدار تعیین شده‌ای از توان اکتیو و راکتیو را به شبکه تحویل دهد و یا مشخصه متغیر با زمانی از پروفایل بار را تعقیب نماید. لذا باید استراتژی‌های کنترل مناسبی را برای سیستم تولید پراکنده پیل سوختی، نمونه‌های PEMFC، SOFC و MCFC معمولاً برای کاربردهای تولید پراکنده استفاده می‌شوند. مدل ارائه شده در این مقاله براساس مدل استفاده شده در [۹] است که در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است.

رابطه (۱) ولتاژ پیل سوختی را بر حسب پارامترهای موجود در مدل نشان می‌دهد:

$$V_{fc} = N_0(E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}})) - rI_{fc} \quad (1)$$

که در آن  $P_{H_2}$ ،  $P_{H_2O}$  و  $P_{O_2}$  توسط رابطه (۲) مشخص می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{H_2} &= -\frac{1}{t_{H_2}} (P_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc})) \\ \dot{P}_{H_2O} &= -\frac{1}{t_{H_2O}} (P_{H_2O} + \frac{2}{K_{H_2O}} K_r I_{fc}) \\ \dot{P}_{O_2} &= -\frac{1}{t_{O_2}} (P_{O_2} + \frac{1}{K_{O_2}} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{fc})) \end{aligned} \quad (2)$$

ثابت  $K_r$  که توسط رابطه (۳) مشخص می‌شود نشان‌دهنده ارتباط بین هیدروژن واکنشی و جریان پیل سوختی است.

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \quad (3)$$

متغیر مهم دیگری که در عملکرد پیل سوختی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند، ضریب بهره برداری واکنش است که با  $U_f$  نشان داده می‌شود. این پارامتر معرف مقدار سوختی است که در واکنش شیمیایی واکنش نشان می‌دهد که از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out}}{q_{H_2}^{in}} = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (4)$$

ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم ساختار سیستم تولید توان پیل سوختی ارائه می‌گردد. سپس مدل‌های مداری دقیق و مدل میانگین مدل DC-DC افزاینده و مدل پیل سوختی تشریح می‌شوند. در بخش سوم، روش الگوریتم اجتماع پرندگان به طور مختصر معرفی می‌شود. در بخش چهارم استراتژی کنترلی پیشنهادی بر اساس روش فیدبک حالت بیان می‌گردد. در انتها، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

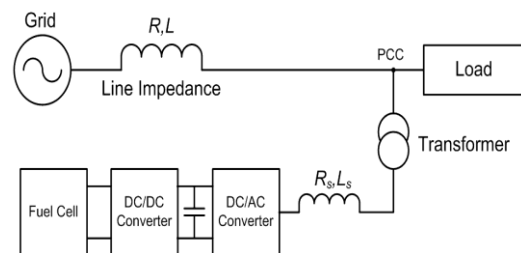
## ۲- ساختار سیستم تولید توان پیل سوختی

شکل (۱) ساختار سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی را نشان می‌دهد. اجزای اصلی این سیستم شامل پیل سوختی از نوع PEM، ذخیره‌ساز انرژی، مبدل‌های توان DC/AC و DC/DC است [۸].

## ۲-۴ مدل سازی پیل سوختی با غشای تبادل

### یونی

امروزه استفاده از پیل‌های سوختی PEM به عنوان منابع تولید پراکنده به علت بازدهی بالا و آلودگی خیلی کم رو به افزایش است. در مقایسه با دیگر تکنولوژی‌های موجود تولید توان، نظیر تولید بادی و آرایه‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی PEM دارای مزیت‌هایی هستند که می‌توانند بدون هیچ محدودیت جغرافیایی در هر مکانی از سیستم توزیع نصب شده، هزینه‌های مربوط به توسعه شبکه جدید را کاهش دهند و باعث افزایش قابلیت اطمینان و بازدهی شوند. وقتی پیل‌های سوختی به شبکه تغذیه وصل می‌شوند، باید عملکردهای مهم و نیازمندی‌های مرتبط با آن را روی سیستم پیل سوختی اعمال کرد.



شکل (۱): سیستم تولید پراکنده پیل سوختی

### ۳- طراحی استراتژی کنترل فیدبک حالت و

#### پیاده سازی مفاهیم کنترل

نقطه تعادل سیستم دینامیکی (V) برابر است با:

$$\tilde{i}_L = 0, \tilde{v}_C = 0$$

هدف از طراحی کنترل کننده برای سیستم آن است که با تنظیم  $\tilde{d}$  بخش تغییرات جریان سلف، ولتاژ خازن با سرعت مطلوبی به صفر میل کند. به عبارت دیگر، ولتاژ خروجی به مقدار مطلوب با بارهای مختلف برسد. با خطی سازی سیستم حول نقطه تعادل داریم:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Ex$$

$$x = \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_C \end{bmatrix}, u = \tilde{d}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{D-1}{L} \\ -\frac{D-1}{C} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{V_{CO}}{L} \\ -\frac{I_{LO}}{C} \end{bmatrix}, E = [0 \quad 1] \quad (10)$$

برای طراحی کنترل کننده از روش فیدبک حالت استفاده می کنیم [۱۱]. بدین منظور، ابتدا باید کنترل پذیری سیستم را بررسی نماییم. ماتریس کنترل پذیری عبارت است از:

$$\Phi_C = [B \quad AB] = \begin{bmatrix} \frac{V_{CO}}{L} & -\frac{R V_{CO}}{L} - \frac{D-1}{L} \frac{I_{LO}}{C} \\ -\frac{I_{LO}}{C} & -\frac{D-1}{C} \frac{V_{CO}}{L} \end{bmatrix} \quad (11)$$

از آنجا که  $0 < D < 1$  و  $V_{CO} > 0$ ، بنابراین، حتی زمانی که  $I_{LO} = 0$  باشد، باز هم رتبه ماتریس  $\Phi_C$  کامل است یا به عبارتی دیگر، سیستم کنترل پذیر کامل حالت است. مفهوم فیزیکی کنترل پذیر بودن کامل حالت آن است که ولتاژ خروجی و جریان آن را به هر مقدار دلخواه و مجزا از هم می توان تنظیم نمود [۱۲]. در این مقاله، هدف ما ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی روی یک مقدار مطلوب بازاری بارهای مختلف است. در طراحی کنترل کننده (بهره فیدبک حالت) چند موضوع باید مورد توجه قرار گیرد:

۱- هرچه فاصله قطب های سیستم از محور موهومی دورتر باشند (بهره بزرگتر باشد)، سیستم زودتر به مقدار نهایی می رسد.

۲- هر چه بهره فیدبک بزرگتر باشد، فراجش بیشتر خواهد بود (حالت گذرای نامطلوب).

برای بهره برداری بهینه از پیل سوختی، مقدار ضریب بهره برداری بالاتر مطلوب است که این مقدار حدود 0.8-0.9 است [۹].

### ۲-۴ مدل سازی مبدل DC-DC افزایشده

شکل (۲) مدل مداری مبدل DC/DC را نشان می دهد [۸]. معادلات دینامیکی سیستم به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{i}_L &= -\frac{R}{L} i_L - \left( \frac{1-d}{L} \right) v_C + \frac{U}{L} \\ \dot{v}_C &= \left( \frac{1-d}{C} \right) i_L - \frac{i_o}{C} \\ y &= v_C \end{aligned} \quad (5)$$

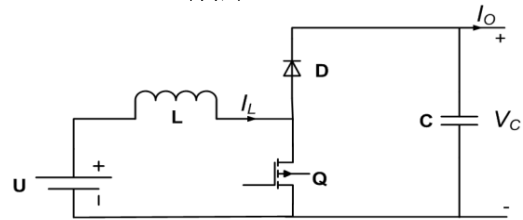
که در آن  $i_L$  جریان سلف،  $v_C$  ولتاژ خازن،  $i_o$  جریان خروجی،  $U$  ولتاژ ورودی،  $R$  مقاومت سلف،  $L$  اندوکتانس سلف و  $d$  سیکل وظیفه سوئیچ قدرت می باشد.

فرض کنید نقاط کار مبدل DC-DC به صورت ذیل باشد:  $V_{CO}$  مقدار ولتاژ خروجی،  $I_{LO}$  جریان متوسط سلف و  $D$  مقدار متوسط سیکل وظیفه.

$$\begin{aligned} \tilde{i}_L &= i_L + I_{LO} \\ \tilde{v}_C &= v_C + V_{CO} \\ \tilde{d} &= d + D \end{aligned} \quad (6)$$

اگر رابطه (۶) در رابطه (۵) جایگزین شود، در این حالت معادلات (۵) به صورت رابطه (۷) در می آید.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_L \\ \dot{\tilde{v}}_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{D-1}{L} \\ -\frac{D-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_C \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{V_{CO}}{L} \\ -\frac{I_{LO}}{C} \end{bmatrix} \tilde{d} + \begin{bmatrix} \frac{d\tilde{v}_C}{L} \\ -\frac{d\tilde{i}_L}{C} \end{bmatrix} \quad (7) \\ \tilde{y} = \tilde{v}_C &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$



شکل (۲): مدار معادل مبدل DC/DC افزایشده

گرفته شده است. الگوریتم تجمعی پرندگان در بخش بعدی توضیح داده شده است.

#### ۴-۱- الگوریتم اجتماع پرندگان

ایده اولیه روش اجتماع ذرات براساس علاقه برای شبیه‌سازی گرافیکی رفتار پروازی جالب و غیرقابل پیش‌بینی پرندگان ایجاد شد [۱۰]. در یک مسأله بهینه‌سازی به روش PSO هر ذره در واقع بیانگر یک جواب بالقوه برای مسأله است. موقعیت ذرات با توجه به تجربه خودشان و همسایگانشان عوض می‌شود. موقعیت و سرعت حرکت ذره  $\vec{a}_m$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{v}_i(t+1) + \vec{x}_i(t) \quad (۸)$$

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 r_1 (P_{gbesti} - \vec{x}_i) + c_2 r_2 (G - \vec{x}_i) \quad (۹)$$

که در آن  $\vec{x}_i(t)$  و  $\vec{v}_i(t)$  به ترتیب موقعیت و سرعت ذره  $i$  ام در زمان  $t$  را نشان می‌دهند،  $\omega$  اینرسی،  $r_1, r_2$  اعدادی تصادفی در بازه (۰ و ۱) هستند،  $C_1, C_2$  ضرایب شتاب نام دارند که اعداد ثابت مثبتی هستند،  $P_{gbesti}$  بالاترین ارزش مکانی پیدا شده توسط ذره  $i$  ام و  $G$  بالاترین ارزش مکانی کلی است. شکل (۳) روند اجرایی الگوریتم اجتماع پرندگان را نمایش می‌دهد.

#### ۵- شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد کنترل‌کننده فیدبک حالت بدون استفاده و با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان برای یک سیستم تولید توان پیل سوختی نمونه بررسی می‌شود. شکل (۴) روند پیاده‌سازی ساختار کنترلی جدید را نشان می‌دهد. در جدول (۱) پارامترهای پیل سوختی نشان داده شده است. فرض کنید:

$$U = 200V, V_{CO} = 400V \Rightarrow D = 0.5, I_o = [40 \ 80]A \Rightarrow I_{LO} = [80 \ 160]A \\ L = 12mH, C = 2500\mu F, R = .001\Omega$$

۳- افزایش بهره فیدبک حالت باعث افزایش پهنای باند شده، در نتیجه سیستم نویزپذیرتر می‌شود [۱۲].

۴- پارامتر  $d$  که سیکل وظیفه کلید است، دارای قید  $0 < d < 1$  است. بنابراین، افزایش بهره باعث عدم برقراری قید می‌شود.

$$0 < d < 1 \Rightarrow -D < \tilde{d} = -Kx < 1 - D \quad (۱۲)$$

موارد فوق نشان می‌دهد که باید بین سرعت میل به نقطه تعادل و مشکلات حالت گذرا و مشکلات سیستم واقعی مصالحه‌ای صورت پذیرد. در بخش شبیه‌سازی، کنترل‌کننده برای یک سیستم نمونه طراحی شده و عملکرد آن روی مدل میانگین و دقیق بررسی شده است.

کنترل‌کننده فیدبک حالت به شدت به پارامترهای سیستم و اغتشاش حساس است. بنابراین، اگر پارامترها کمی تغییر کنند یا از ابتدا دقیقاً مشخص نباشند و یا اگر بعضی از پارامترها مانند تلفات کلیدزنی، ولتاژ مستقیم و مقاومت دیود در نظر گرفته نشوند، پاسخ سیستم واقعی دارای خطای حالت ماندگار خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل، یک کنترل‌کننده انتگرالی مطابق با رابطه (۱۳) به کنترل‌کننده اضافه می‌شود [۱۲]. اگرچه مزیت استفاده از انتگرال‌گیر صفر کردن خطای حالت ماندگار است، ولی عیب عمده آن، این است که سبب کند شدن پاسخ سیستم می‌گردد [۱۳].

$$\tilde{d} = -Kx + K' \int \tilde{y}(t) dt \quad (۱۳)$$

#### ۴- طراحی استراتژی کنترل پیشنهادی

همان طور که بیان شد، به هنگام استفاده از کنترل فیدبک حالت، دینامیک خطایی ایجاد می‌شود که به صورت سعی و خطا انتخاب می‌شود. این نوع انتخاب لزوماً عملکرد بهینه را در پی نخواهد داشت. به منظور برطرف کردن این عیب (صفر کردن خطای حالت ماندگار) و به منظور دستیابی به عملکرد بهینه، در این مقاله از الگوریتم تجمعی پرندگان استفاده می‌شود. به عبارتی، با استفاده از الگوریتم تجمعی پرندگان ضرایب فیدبک حالت بهینه انتخاب می‌شوند به گونه‌ای که معیار عملکردی مورد نظر می‌نیمم گردد. در این مقاله معیار عملکردی انتگرال مربع خطا در نظر

جدول (۱): پارامترهای پیل سوختی

پارامتر	مقدار
F	96484600[C/kmol]
$t_{H_2}$	26.1 [s]
$K_{H_2}$	$8.43 \times 10^{-4}$
$k_r$	$9.9497 \times 10^{-7}$
$E_0$	0.6 [V]
$N_0$	384
$t_{O_2}$	2.91[s]
$K_{O_2}$	$2.52 \times 10^{-3}$
r	0.126 [ $\Omega$ ]
T	343 [K]
R	8314.47 [J/(kmol K)]
$U_f$	0.8
$t_{H_2O}$	78.3 [s]
$K_{H_2O}$	$2.81 \times 10^{-4}$



شکل (۴): روند پیاده‌سازی ساختار کنترلی جدید

هدف اصلی، ثابت بودن ولتاژ خروجی بارهای مختلف (با در نظر گرفتن مقادیر نامی متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم،

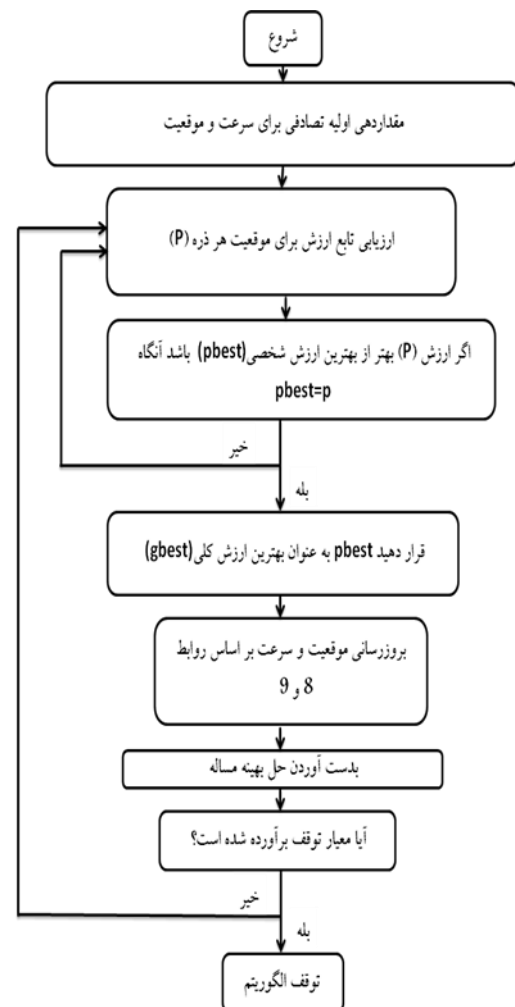
قطب‌های سیستم حلقه باز روی

$$P_{OL} = [-0.0417 + j91.2871, -0.0417 - j91.2871]$$

قرار داشته که به محور موهومی بسیار نزدیک است، لذا سرعت میل به نقطه تعادل مطلوب بسیار کند خواهد بود.

با توجه به مصالح‌های که بین سرعت پاسخ و مشکلات ناشی از افزایش بهره صورت پذیرفت، قطب‌های مطلوب سیستم حلقه بسته برابر  $PCL = [-140 - 150]$  تعیین شدند. لذا با استفاده از روش آکرمن، مقادیر بهره فیدبک حالت معمولی به دست می‌آیند.

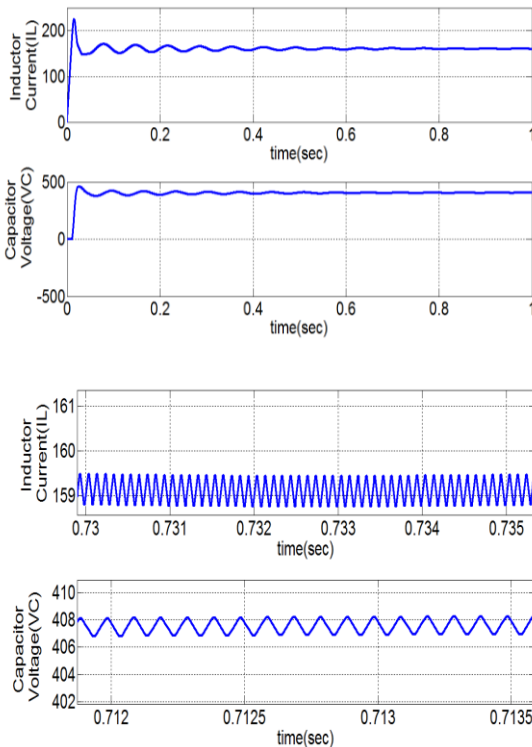
$$K = [k_1 \ k_2] = [0.0088268 \quad 0.00013469]$$



شکل (۳): الگوریتم اجتماع پرندگان

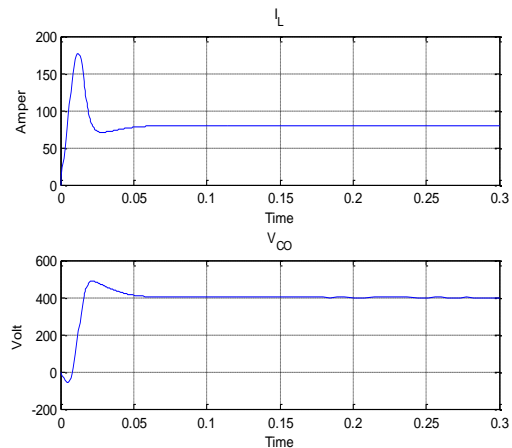
می‌کند، در حالی‌که در سیستم میانگین خطا کاملاً صفر می‌شود. علت این امر این است که در سیستم میانگین پارامترهای نامعلوم از قبیل ولتاژ مستقیم دیود، مقاومت آن، تلفات کلیدزنی، تغییرات ولتاژ ورودی ناشی از پیل سوختی و غیره در نظر گرفته نشده، در حالی‌که این پارامترها در مدل دقیق مبدل DC-DC لحاظ شده‌اند، لذا باعث خطای ماندگار در خروجی می‌گردند. در این مقاله به منظور صفر کردن خطای ماندگار در خروجی از الگوریتم اجتماع پرندگان استفاده می‌کنیم. بهره فیدبک حالت با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان  $K=[k_1 \ k_2]=[4.3991 \ 0.8312]$  به دست می‌آید. در الگوریتم اجتماع پرندگان تعداد ذرات و مراحل تکرار برابر ۱۰۰،  $C_1, C_2$  برابر ۲ و  $\omega$  برابر با  $0.8$  در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی بر پایه مدل دقیق مبدل در شکل (۸) نشان داده شده است.

ملاحظه می‌گردد که در این حالت ولتاژ خروجی مبدل بدون خطا به مقدار نامی از پیش تعیین‌شده همگرا شده است. شکل (۹) تغییرات بهره‌های فیدبک حالت را با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان نشان می‌دهد.



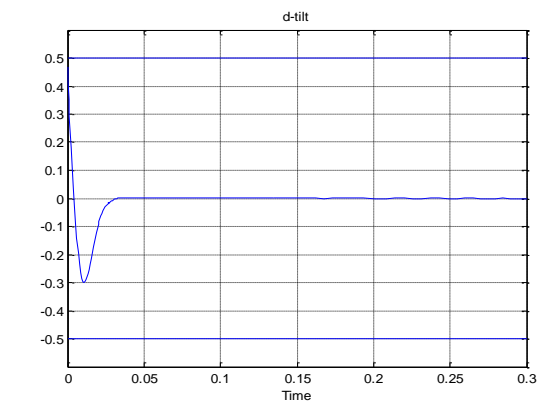
شکل (۷): جریان ورودی (سلف) و ولتاژ خروجی در مدل

دقیق مبدل با کنترل کننده فیدبک حالت معمولی



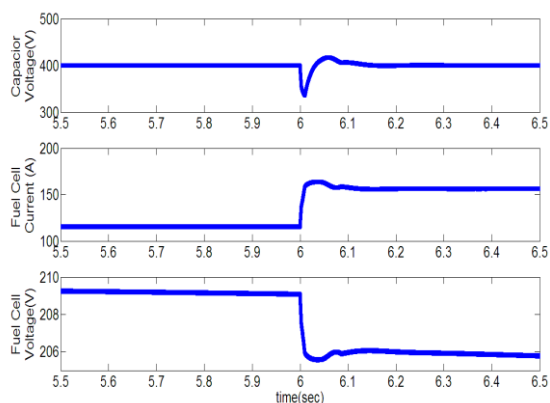
شکل (۵): کنترل جریان ورودی و ولتاژ خروجی در مدل

میانگین غیرخطی مبدل

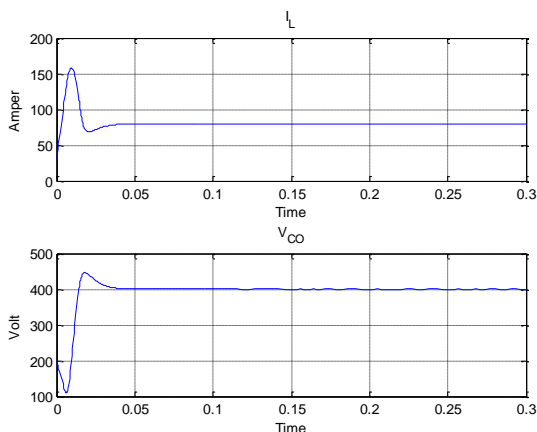


شکل (۶): سیگنال کنترل  $\tilde{d}$

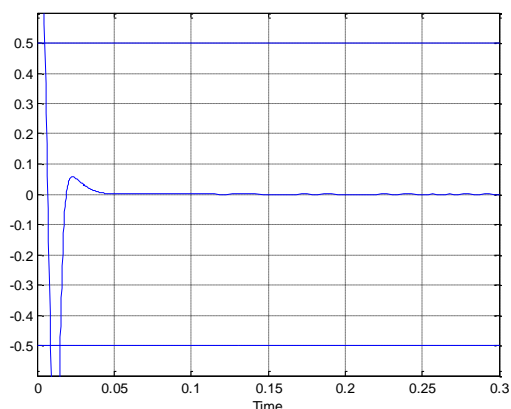
شایان ذکر است هرچند کنترل کننده بر روی سیستم خطی میانگین طراحی می‌شود، اما برای سیستم واقعی که ذاتاً غیرخطی بوده، بخش غیرخطی آن قابل تفکیک از بخش خطی نیست، پیاده‌سازی می‌گردد. شکل (۵) عملکرد کنترل کننده را روی سیستم میانگین غیرخطی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطای سیستم سریعاً به مقدار صفر همگرا می‌شود. شکل (۶) تایید می‌کند که قید  $-D = -0.5 < \tilde{d} = -Kx < 1 - D = 0.5$  برقرار است. شکل (۷) عملکرد کنترل کننده را براساس مدل دقیق مبدل DC-DC نشان می‌دهد. مشخص است که ولتاژ خروجی و جریان سیستم حتی با تغییر مقدار جریان خروجی در لحظه  $0.73$  به مقدار نامی میل می‌کنند. با دقت در ولتاژ خروجی با مقیاس کوچکتر (شکل (۷))، این مهم دریافت می‌شود که ولتاژ خروجی دقیقاً به مقدار مطلوب میل نمی‌کند، بلکه آن را با یک خطای نسبتاً ثابت دنبال



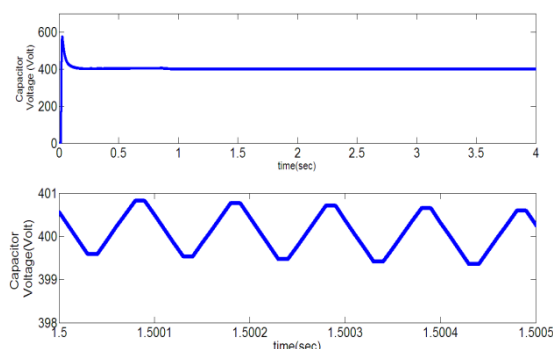
شکل (۱۰): ولتاژ خروجی، جریان ورودی (سلف) و ولتاژ پیل سوختی با در نظر گرفتن مدل دقیق مبدل با تغییر بار در لحظه  $t=6 \text{ Sec}$  برای کنترل کننده پیشنهادی



شکل (۱۱): کنترل جریان ورودی و ولتاژ خروجی در مدل میانگین غیرخطی مبدل برای کنترل کننده فیدبک حالت معمولی

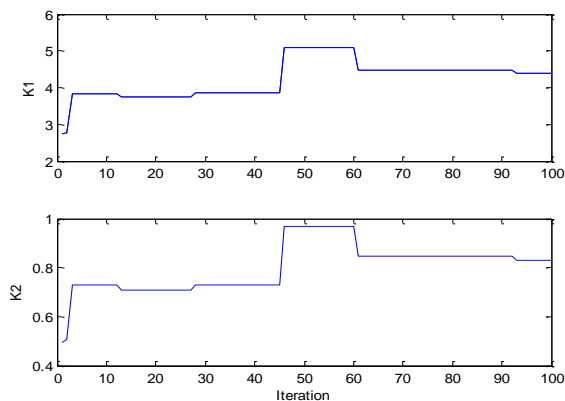


شکل (۱۲): سیگنال کنترل  $\bar{d}$  برای کنترل کننده برای کنترل کننده فیدبک حالت معمولی



شکل (۸): جریان ورودی (سلف) و ولتاژ خروجی در مدل دقیق مبدل با الگوریتم اجتماع پرندگان

علاوه بر این، به منظور تایید بر عملکرد استراتژی کنترل طراحی شده، شبیه سازی دیگری انجام شده است. در این حالت تغییرات جریان بار در خواستی در لینک DC از 60A به 80A انجام می گردد. تغییرات ولتاژ لینک DC به همراه تغییرات ولتاژ و جریان خروجی پیل سوختی در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده می شود، ولتاژ خروجی مبدل DC-DC تحت تغییرات بار به خوبی در مقدار 400V ثابت نگه داشته می شود. همچنین با افزایش جریان بار ولتاژ خروجی پیل سوختی کاهش پیدا می کند. شکل (۱۱) کنترل جریان ورودی در مدل میانگین غیرخطی مبدل و سیگنال کنترل  $\bar{d}$  برای کنترل کننده برای کنترل کننده فیدبک حالت معمولی را نشان می دهند. شکل (۱۲) نیز ولتاژ خروجی در مدل میانگین غیرخطی مبدل و سیگنال کنترل  $\bar{d}$  برای کنترل کننده برای کنترل کننده فیدبک حالت معمولی را نشان می دهند. از شکل (۱۲) مشاهده می شود قید ورودی برآورده نشده است.



شکل (۹): تغییرات بهره های فیدبک حالت با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان



- System Application in Power System, pp. 1-7, 2007.
- [8] Hajizadeh, A., Golkar, M. A., "Intelligent Power Management Strategy of Hybrid Distributed Generation System", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, No. 10, pp. 783-795, 2007.
- [9] Hajizadeh, A., Golkar, M. A., Feliachi, A., "Voltage Control and Active Power Management of Hybrid Fuel-Cell/Energy-Storage Power Conversion System Under Unbalanced Voltage Sag Conditions", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 4, pp. 1195-1208, 2010.
- [10] Alfi, A., "Particle Swarm Optimization Algorithm with Dynamic Inertia Weight for Online Parameter Identification Applied to Lorenz Chaotic System", International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 8, No. 2, pp. 1191-1203, 2012.
- [11] Yue, D., Han, Q. L., Peng, C., "State feedback controller design of networked control systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 51, pp. 640-644, 2004.
- [12] Chen, C. T., Introduction to Linear System Theory, Holt Rinehart and Winston, 1970.
- [13] Kuo, B. C., Automatic Control Systems, Prentice Hall, 7Ed., 1995.

### فهرست علائم:

$N_0$	تعداد پیل‌های سری شده در یک پشته
$E_0$	[V] ولتاژ بی‌باری استاندارد
$R$	ثابت جهانی گازها $[(1 \text{ atm})/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$
$T$	[K] دمای مطلق
$I_{f0}$	[A] جریان پیل سوختی
$F$	[C/kmol] ثابت فارادی
$K_{H_2}$	ثابت مولار درجه هیدروژن $[\text{mol}/(\text{atm}\cdot\text{s})]$
$K_{H_2O}$	ثابت مولار درجه آب $[\text{kmol}/(\text{atm}\cdot\text{s})]$
$K_{O_2}$	ثابت مولار درجه اکسیژن $[\text{kmol}/(\text{atm}\cdot\text{s})]$
$K_f$	ثابت مدل سازی $[\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{A})]$
$P_{H_2}$	[atm] فشار جزئی هیدروژن
$P_{H_2O}$	[atm] فشار جزئی آب
$P_{O_2}$	[atm] فشار جزئی اکسیژن
$q_{H_2}^{in}$	[kmol/s] فلوی ورودی هیدروژن
$q_{H_2}^{out}$	[kmol/s] فلوی خروجی هیدروژن
$q_{O_2}^{in}$	[kmol/s] فلوی ورودی اکسیژن
$q_{H_2}^r$	[kmol/s] مقدار فلوی هیدروژنی که واکنش می‌کند

### ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی استراتژی کنترل بهینه ولتاژ و جریان بر مبنای فیدبک حالت برای مبدل‌های DC-DC افزاینده در سیستم‌های تولید توان پیل سوختی ارائه شد که برای دستیابی به عملکرد بهینه، در طراحی استراتژی پیشنهادی از الگوریتم اجتماع پرندگان استفاده گردید. علاوه بر این کنترل‌پذیری سیستم و محدوده پایداری آن نیز به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد استراتژی کنترل پیشنهادی با پیاده‌سازی بر روی مدل میانگین و هم بر روی مدل دقیق مبدل بررسی شده که نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن می‌باشد.

### مراجع:

- [1] Lee, K. Y., "The Effect of DG Using Fuel Cell under Deregulated Electricity Energy Markets", Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [2] Mehta, G., Singh, S. P., "Active and reactive power control of Proton Electrolyte Membrane Fuel Cell based Distributed Generation System", International Conference on Power Electronic, pp. 1-6, 2011.
- [3] Jiang, Z., Gao, L., Dougal, R. A., "Adaptive Control Strategy for Active Power Sharing in Hybrid Fuel Cell/Battery Power Sources", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 507-515, 2007.
- [4] Fathi, S. H., Rastegar, H., Ghadim, A. A., "Control of islanded industrial networks with fuel cell based distributed generation units and ultra-capacitor storage device", European Transactions on Electrical Power, Vol. 21, No. 1, pp. 801-823, 2011.
- [5] Wang, C., Nehrir, M. H., Gao, H., "Control of PEM Fuel Cell Distributed Generation Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp. 586-595, 2006.
- [6] Samosir, A. S., Yatim, A. H. M., "Implementation of Dynamic Evolution Control of Bidirectional DC-DC Converter for Interfacing Ultracapacitor Energy Storage to Fuel Cell System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 10, pp. 3468-3473, 2010.
- [7] Hajizadeh, A., Golkar, M. A., "Intelligent Control of Fuel Cell Distributed Generation Systems", 14th International Conference of Intelligent

R	[ $\Omega$ ] مقاومت داخلی پیل سوختی
$t_{H_2}$	[s] ثابت زمانی هیدروژن
$t_{O_2}$	[s] ثابت زمانی اکسیژن
$t_{H_2O}$	[s] ثابت زمانی آب