

کنترل فازی پیل سوختی پلیمری به منظور جذب ماکزیمم توان

زهرا نجاتی^(۱) - فرید شیخ الاسلام^(۲) - حمید محمودیان^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد

(۲) استاد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۲

خلاصه: پیل سوختی پلیمری از نقطه نظر طراحی و کارکرد یکی از جذابترین انواع پیل سوختی است. این نوع از پیل‌های سوختی در مقایسه با انواع دیگر پیل سوختی، برای یک حجم و وزن معلوم، توان بیشتری تولید می‌کند. با این حال یکی از موانع گسترش استفاده از این سیستم‌ها راندمان پایین آن‌ها می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن است که برای غلبه بر راندمان پایین پیل سوختی پلیمری از تعقیب نقطه ماکزیمم توان استفاده گردد. با توجه به مشخصه جریان-توان پیل سوختی، که یک منحنی غیر خطی و دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد و با استفاده از کنترلر فازی و انتخاب مناسب توابع عضویت ورودی و خروجی سعی بر آن است که سیستم همواره در نقطه ماکزیمم توان کار کند. برای این منظور از یک چاپر بین پیل سوختی و بار استفاده می‌شود و برای تنظیم سیکل کاری موج اعمالی به آن یک کنترل کننده فازی نوع TSK^۱ به کار برده می‌شود که ورودی های آن شیب منحنی جریان-توان و تغییرات شیب می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد این کنترل کننده عملکرد مناسبی دارد و در مقایسه با روش کنترلی اغتشاش و مشاهده سریع‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی پلیمری، ماکزیمم توان، کنترل فازی، TSK.

Fuzzy Control of Polymer Fuel Cell for Attraction Maximum Power

Zahra Nejati⁽¹⁾ - Farid Sheikholeslam⁽²⁾ - Seyyed Hamid Mahmoodian⁽³⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University Najafabad Branch
Nejati.zahra@yahoo.com

(2) Professor - Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology
sheikh@cc.iut.ac.ir

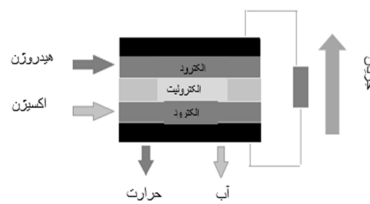
(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University Najafabad Branch
Mahmoodian_hamid@yahoo.com

Polymer fuel cell is one of the most attractive fuel cells from point of the design and operation and also in comparison with other types of fuel cell, for a weight and size, polymer fuel cell produces more power. But, one of the problems to use this system is its low efficiency. To overcome the low efficiency of the fuel cell polymer in this paper is tried to used from maximum power point tracking. According to the characteristic of the flow -power the fuel cell, which is a non-linear curve and has a maximum point and use of the fuzzy controller and the proper selection of input and output membership functions it was tried to the system always works at maximum power. For this purpose, a chopper is used between the fuel cell and the load and to adjust the duty cycle of the applied signal to it is applied the fuzzy-TSK type controller that its inputs are stream slope and slope changes. The results show that this controller has a good performance and that is faster compared with the perturbation and observation method.

Index Terms: Polymer fuel cell, maximum power, fuzzy control, TSK.

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی از فن آوری‌های تبدیل انرژی هستند که مستقیماً انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. شکل (۱) شماییک پیل سوختی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شماتیک یک پیل سوختی ساده [۱]

Fig. (1): Shape of simple Fuel Cell

پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، حداقل نشر آلاینده‌های زیست محیطی، استفاده از سوخت‌های فسیلی و پاک، مدولار بودن، قابلیت تولید همزمان حرارت و الکتریسیته، استفاده در کاربردهای تولید غیرمتمرکز انرژی و همچنین آرام و بی سرو صدا بودن در موارد مختلفی مانند حمل و نقل و نیروگاه‌ها به کار می‌روند [۱]. با توجه به نوع الکترولیت به کار رفته در آنها، دمای فعالیت پیل، نوع سوخت، اکسید کننده، مبدل سوخت و... به انواع مختلفی مانند پلیمری، قلیایی، اسید فسفریکی و... تقسیم‌بندی می‌شوند. از میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی پلیمری (PEMFC)^۲، به دلیل دمای عملکرد پایین (زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد) و پاسخ دینامیکی خوب بیشتر مورد توجه است. اما همواره یکی از موانع گسترش استفاده از پیل‌های سوختی پلیمری، راندمان پایین آن‌ها می‌باشد. برای داشتن راندمان بالاتر از روش‌های تعقیب نقطه‌ی ماکزیمم توان استفاده می‌شود. روش‌های زیادی برای تعقیب نقطه ماکزیمم توان (MPPT^۳) وجود دارد، مانند روش اغتشاش و مشاهده (P&O)^۴، هدایت افزایشی^۵، ولتاژ مدار باز کوچک^۶، جریان اتصال کوتاه کوچک^۷، کنترل فازی^۸، شبکه‌های عصبی^۹، کنترل وابستگی ریپل^{۱۰}، جاروب جریان^{۱۱}، کنترل کاهش خازن لینک DC^{۱۲}، ماکزیمم کردن ولتاژ و جریان بار^{۱۳} و کنترل لغزشی^{۱۴} و ... [۲]. این روش‌ها در سیستم‌های فوتوولتائیک و پیل سوختی مشترک هستند.

از میان روش‌های متعددی که برای تعقیب نقطه‌ی ماکزیمم توان ارائه گردیده، روش P&O به دلیل برخورداری از الگوریتمی ساده و امکان تحقق آسان، با اقبال خوبی از سوی محققان رو به رو شده است [۳-۵]. روش P&O می‌تواند با اعمال یک اغتشاش در پیل سوختی اجرا شود. در مورد پیل سوختی این اغتشاش می‌تواند تغییر کوچکی در مقدار جریان یا ولتاژ خروجی باشد. بر اثر ایجاد اغتشاش تغییرات توان می‌تواند مثبت یا منفی باشد. اگر تغییرات توان مثبت بود بدان معناست که سیستم به نقطه‌ی ماکزیمم توان نزدیک شده و تغییرات باید در امتداد مرحله قبل اعمال شود و اگر تغییرات توان منفی بود

بدان معناست که سیستم از نقطه‌ی بهینه دور شده است و تغییرات اعمالی باید بر خلاف امتداد مرحله‌ی قبل باشد. مثلاً اگر کاهش جریان موجب افزایش توان گردد باید کاهش بیشتری در جریان بدهیم در غیر این صورت جریان را افزایش می‌دهیم. عملکرد P&O در صورتی مناسب و مطمئن خواهد بود که از رویارویی این الگوریتم با تغییرات سریع و ناگهانی سیستم جلوگیری گردد و همچنین مقدار اغتشاش اعمالی تأثیر زیادی در عملکرد آن دارد.

[۶] و [۷] کنترل مد لغزشی را برای برآوردن هدف پروژه مد نظر قرار داده‌اند. کنترل مد لغزشی یک روش کنترل غیر خطی مقاوم است که بر پایه‌ی معرفی معادله‌ی سطح لغزش و سپس تولید سیگنال کنترل استوار است. در واقع برای قرار گرفتن سیستم در مد لغزشی باید قانون کنترل به گونه‌ای انتخاب گردد که شرط لغزش را برآورده کند. این روش کنترل، برای ردیابی توان ماکزیمم نسبت به روش P&O از لحاظ پاسخ حالت گذرا، خطای ردیابی کم و واکنش سریع به تغییر نقطه کار موفق‌تر عمل کرده است. همچنین این روش پایدار سیستم را تضمین می‌کند، اما پاسخ سیستم حلقه بسته دارای نوسانات تند^{۱۵} می‌باشد. برای حل این مشکل نوسان، می‌توان از ترکیب کنترل کننده لغزشی با کنترل‌های دیگر مانند فازی استفاده کرد.

در [۸] و [۹] از روش شبکه‌های عصبی استفاده شده است. این روش نیاز به حجم حافظه‌ی زیادی دارد. در [۱۰] یک الگوریتم بهینه سازی PSO^{۱۶} بر پایه‌ی الگوریتم MPPT برای ردیابی توان ماکزیمم ارائه شده است. در [۱۰] یک مبدل بوست استفاده شده است و کنترلر ارائه شده سیکل کاری مبدل را برای ردیابی ماکزیمم توان تعیین می‌کند. الگوریتم ارائه شده دارای دقت بالایی می‌باشد.

در این مقاله سعی بر آن است که برای غلبه بر راندمان پایین PEMFC از تعقیب نقطه ماکزیمم توان استفاده گردد. با توجه به مشخصه جریان- توان پیل سوختی که یک منحنی غیر خطی است و دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد، در این مقاله با استفاده از کنترل کننده فازی و انتخاب مناسب توابع عضویت ورودی و خروجی، سعی بر آن است که سیستم همواره در نقطه ماکزیمم توان کار کند. برای این منظور از یک چاپر بین پیل سوختی و بار استفاده می‌شود و برای تنظیم سیکل کاری موج اعمالی به آن یک کنترل کننده فازی به کار برده می‌شود، که ورودی‌های آن شیب منحنی جریان- توان و تغییرات شیب می‌باشد. کنترل کننده فازی به کار رفته در این مقاله کنترل کننده فازی نوع TSK می‌باشد. این کنترل کننده دارای طراحی ساده می‌باشد، به اطلاعات دقیق از سیستم نیاز ندارد و هزینه پیاده سازی آن نسبت به کنترل‌های کلاسیک کمتر است و همچنین این کنترل کننده در برابر اغتشاشات مقاوم است. کنترل کننده نوع TSK نسبت به نوع ممدانی دقیق‌تر بوده و می‌تواند یک سیستم بسیار غیر خطی را با تعداد کمی از قواعد توصیف کند. به علاوه برای تعیین ضرایب مجهول در قواعد فازی، از یک الگوریتم بهینه سازی به نام الگوریتم کلی استفاده می‌گردد. در این مقاله کنترل کننده فازی نوع TSK با

T به ترتیب فشار جزئی هیدروژن، فشار جزئی اکسیژن و دمای عملکرد پیل سوختی می‌باشند.

$$V_{Eernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T (\ln(P_{H_2}) + .5 \ln(P_{O_2})) \quad (2)$$

تلفات فعالسازی و اهمی با استفاده از معادلات (۳) و (۴) به دست می‌آید.

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 T + \varepsilon_3 T \ln(C_{O_2}) + \varepsilon_4 T \ln(I_{FC}) \quad (3)$$

$$V_{ohm} = I_{FC} R_M \quad (4)$$

که در آنها ε_{1-4} ضرایب پارامتری برای هر مدل پیل سوختی می‌باشد. R_M و C_{O_2} به ترتیب غلظت اکسیژن در سطح مشترک کاتالیست و کاتد و مقاومت کاتالیست است که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{(5.08 \times 10^6) \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (5)$$

$$R_M = \frac{r_m t_m}{A} \quad (6)$$

r_m مقاومت ویژه‌ی توده بوده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید. A و t_m به ترتیب ضخامت پوسته و مساحت سطح مقطع می‌باشند.

$$r_m = \frac{1.181[1 + 0.03\left(\frac{I_{FC}}{A}\right) + 0.0062\left(\frac{T}{303}\right)^2\left(\frac{I_{FC}}{A}\right)^{2.5}]}{[\lambda_m - 0.634 - 3\left(\frac{I_{FC}}{A}\right)] \exp(4.18\left(T - \frac{303}{T}\right))} \quad (7)$$

λ_m پارامتر قابل تنظیمی است که به رطوبت نسبی بستگی دارد و حداکثر میزان آن ۲۳ است. تلفات انتقال جرم نیز از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید.

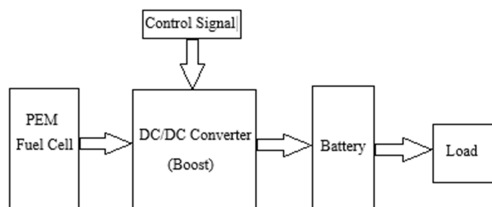
$$V_{conc} = -\frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{I_{FC}}{i_0 A}\right) \quad (8)$$

سپس ولتاژ سلول از رابطه‌ی (۱) به دست آمده و چون سلول‌ها با هم سری شده‌اند تا یک توده‌ی پیل سوختی را تشکیل دهند ولتاژ کل توده از رابطه (۹) به دست می‌آید که در آن N_{FC} نشان دهنده‌ی تعداد پیل‌های سوختی سری شده است.

$$V_{FC} = N_{FC} V_{cell} \quad (9)$$

۳- طراحی کنترل کننده

بلوک دیاگرام کلی مورد مطالعه در این پروژه در شکل (۳) نشان داده شده است. این فرایند شامل پیل سوختی، چاپر DC، بار و باتری می‌باشد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام سیستم و کنترلر استفاده شده

Fig. (3): Diagram of system and used controller

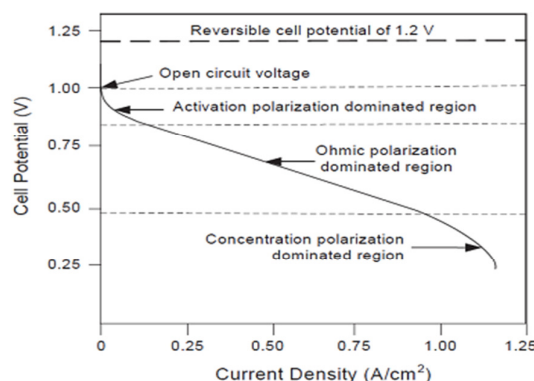
کنترل کننده P&O مقایسه شده است نتایج نشان می‌دهد کنترل کننده نوع TSK قادر است توان ماکزیمم را با نوسان کمتر و سرعت بیشتری نسبت به نوع P&O ردیابی کند.

این مقاله به صورت زیر مرتب شده است:

در بخش (۲) مدل PEMFC آورده شده است. در بخش (۳) کنترلر طراحی می‌گردد و عملکرد آن با الگوریتم‌های مشابه مقایسه می‌شود. در نهایت نتایج در بخش (۴) بیان می‌گردد.

۲- مدل پیل سوختی پلیمری (PEMFC)

در پیل سوختی، سلول‌ها دارای بالاترین ولتاژ خود، فقط در شرایط مدار باز می‌باشند و با افزایش جریان کشیده شده در پیل ولتاژ افت پیدا می‌کند. در واقع پیل سوختی شبیه یک منبع ولتاژ با مقاومت داخلی عمل می‌کند. منحنی قطبش^{۱۷} پیل سوختی، در شکل زیر نشان داده شده است. این منحنی که ولتاژ را بر حسب جریان نشان می‌دهد شامل سه ناحیه است. اولین ناحیه افت ولتاژ ناشی از واکنش شیمیایی اتفاق افتاده در هر دو الکترود (کاتد و آند) را بیان می‌کند و ناحیه‌ی فعال سازی^{۱۸} نام دارد. بر حسب دما، فشار، نوع الکترود و کاتالیست استفاده شده این ناحیه دارای گستردگی بیشتر یا کمتر می‌باشد. دومین ناحیه تلفات مقاومتی، ناشی از مقاومت داخلی توده پیل سوختی، که شامل مقاومت پوسته مقاومت الکترودها است را بیان می‌کند و ناحیه‌ی مقاومتی^{۱۹} نام دارد. سومین ناحیه تلفات ناشی از غلظت واکنش دهنده را بیان می‌کند و ناحیه‌ی انتقال جرم^{۲۰} نام دارد [۱۱].



شکل (۲): منحنی قطبی پیل سوختی [۱۱]

Fig. (2): Polarazation curve of Fuel Cell [11]

بر اساس منحنی قطبش پیل سوختی، معادلات ریاضی آن به صورت زیر می‌باشد. در واقع با کشیدن جریان از پیل سوختی ولتاژ مدار باز به دلیل وجود تلفات به صورت زیر افت پیدا می‌کند [۱۲-۱۴].

$$V_{cell} = V_{Eernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1)$$

در معادله (۲)، V_{Eernst} ولتاژ مدار باز می‌باشد که در شرایط ایده آل و در مدل ساده به صورت زیر به دست می‌آید. در این رابطه، P_{O_2} ، P_{H_2}

با توجه به معادله (۱۰) سیگنال خطا در واقع شیب منحنی می‌باشد. مثبت یا منفی بودن بودن سیگنال خطا محل لحظه‌ای نقطه کار پیل سوختی را به دو بخش تقسیم می‌کند. طبق شکل (۳) در صورتی که سیگنال خطا مثبت باشد می‌توان نتیجه گرفت نقطه کار در سمت چپ نقطه ماکزیمم توان قرار دارد و در صورتی که منفی باشد، سیگنال خطا در سمت راست نقطه ماکزیمم توان قرار خواهد داشت. در سیکل‌های کاری کوچک، شیب منحنی مثبت و خیلی زیاد است و در سیکل‌های کاری بزرگ، شیب‌های منحنی به سمت منفی شدن می‌رود. سیگنال تغییرات خطا با توجه به معادله (۱۱) به دست می‌آید و در واقع جهت حرکت نقطه کار را تعیین می‌کند. برای مثال اگر سیگنال خطا مثبت و سیگنال تغییرات خطا منفی باشد، آنگاه نتیجه می‌گیریم اولاً نقطه کار در سمت چپ نقطه ماکزیمم توان قرار دارد و ثانیاً نقطه کار در حال نزدیک شدن به نقطه ماکزیمم توان می‌باشد.

در منحنی توان-جریان، با افزایش دما، توان افزایش می‌یابد. علت آن هم این است که افزایش دما سبب بهبود عملیات انتقال جرم شده و مقاومت کلی پیل کاهش می‌یابد (با افزایش دما هدایت الکترونی در فلز کاهش و هدایت یونی در الکترولیت افزایش می‌یابد). به طور معمول دمای کارکرد پیل‌های سوختی پلیمری بین ۷۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

حال با توجه به منحنی مورد بررسی، کنترل کننده فازی نوع TSK برای ردیابی توان ماکزیمم در بخش بعد طراحی می‌گردد.

۳-۲- کنترل کننده فازی نوع TSK

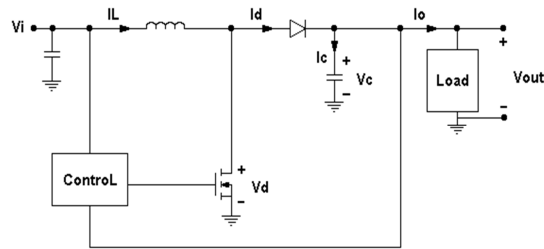
ویژگی بسیار مهم مدل TSK قدرت نمایشگری^{۲۱} آن است. این مدل قادر است یک سیستم بسیار غیر خطی را با تعداد کمی از قواعد توصیف کند. در این روش فضای ورودی به نواحی فازی مختلف تجزیه شده و سیستم در هر ناحیه با یک مدل ساده تقریب زده می‌شود. مدل فازی کلی ترکیب زیر سیستم‌هایی با مدل‌های ساده‌تر است. تعداد قواعد فازی با تعداد پارته‌ن بندوی ورودی برابر است. اساساً مدل TSK شامل قواعد IF-Part به شکل زیر است.

If x_1 is A_{i1} and x_2 is A_{i2} and ... x_r is A_{ir} Then y_i
 $= b_{i0} + b_{i1}x_1 + \dots + b_{ir}x_r$

که در آن $i=1, \dots, l$ تعداد قواعد است. x_i ها متغیرهای ورودی و y_i ها متغیرهای خروجی هستند و A_{ij} ها مجموعه‌های فازی هستند که به وسیله‌ی توابع عضویت مشخص می‌شوند. b_{ij} ها پارامترهایی با مقادیر حقیقی می‌باشند. خروجی مدل TSK از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^l \tau_i y_i}{\sum_{i=1}^l \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^l \tau_i (b_{i0} + b_{i1}x_1 + \dots + b_{ir}x_r)}{\sum_{i=1}^l \tau_i} = \sum_{i=1}^l w_i (b_{i0} + b_{i1}x_1 + \dots + b_{ir}x_r) \quad (12)$$

چاپر می‌تواند جهت افزایش یا کاهش پله‌ای ولتاژ منبع DC به کار گرفته شود. از این رو می‌توان چاپرها را به دو دسته سویچر کاهنده و سویچر افزایشنده تقسیم کرد [۱۵]. در سویچر افزایشنده یا رگولاتور بوست ولتاژ خروجی می‌تواند بیشتر از ولتاژ ورودی باشد که به همین علت چنین نامگذاری شده است. یک رگولاتور بوست که از یک MOSFET قدرت استفاده می‌کند در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): رگولاتور بوست [۱۵]
 Fig. (4): Boost regulator [15]

برای طراحی کنترل کننده در این قسمت ابتدا به بررسی منحنی توان-جریان پیل سوختی پلیمری پرداخته و بر اساس آن کنترل کننده فازی نوع TSK برای جذب توان بیشینه از پیل سوختی پلیمری طراحی می‌گردد.

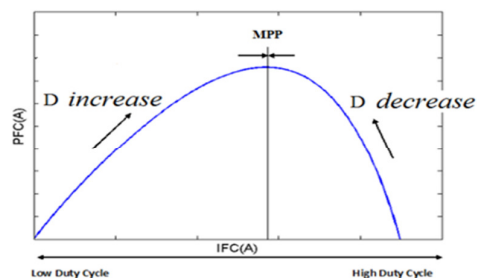
منحنی ولتاژ-جریان و توان-جریان پیل سوختی رفتاری کاملاً غیر خطی دارد. همان طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، منحنی توان-جریان پیل سوختی، فقط دارای یک نقطه‌ی ماکزیمم می‌باشد. برای جذب توان بیشینه از سلول، باید شرایطی فراهم شود که همواره در این نقطه ماکزیمم توان کار کنیم.

ورودی‌های مورد نظر برای طراحی کنترل کننده شیب منحنی و تغییرات شیب می‌باشند که با توجه به معادلات (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{I(n) - I(n-1)} \quad (10)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (11)$$

که E، شیب منحنی یا خطا و ΔE ، تغییرات شیب یا تغییرات خطا است. n زمان نمونه برداری، P(n) توان الکتریکی لحظه‌ای آرایه پیل سوختی و I(n) جریان لحظه‌ای معادل می‌باشد.



شکل (۵): منحنی توان-جریان پیل سوختی پلیمری [۶]
 Fig. (5): Power-current curve of polymer fuel cell [6]

این الگوریتم پارامترهای b را از طریق مینیمم کردن تابع هدف (۱۵) به دست می‌آورد. می‌توان (۱۵) را به فرم ساده‌تر زیر نوشت:

$$J_G = (d - Xb)^T(d - Xb), d = [d(1) \dots d(N)]^T \in R^N \quad (17)$$

برای استفاده از این روش N داده آموزشی داریم و خروجی را در هر N داده می‌دانیم. برای به دست آوردن خروجی در این داده‌ها از سعی و خطا استفاده می‌کنیم. مثلاً اگر ورودی خطا (w/A) ۲۴ و تغییرات خطا (w/A) -۴ باشد با سیکل کاری ۴، نقطه کار به سمت نقطه بهینه یعنی ماکزیمم توان می‌رود. این خروجی‌ها d نام دارند. حال ماتریس زیر را تشکیل می‌دهیم:

$$X = \begin{bmatrix} w_1(1) & w_1(1)x_1(1) & \dots & w_1(1)x_r(1) & \dots & w_L(1) & \dots & w_L(1)x_r(1) \\ w_1(2) & w_1(2)x_1(2) & \dots & w_1(2)x_r(2) & \dots & w_L(2) & \dots & w_L(2)x_r(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_1(N) & w_1(N)x_1(N) & \dots & w_1(N)x_r(N) & \dots & w_L(N) & \dots & w_L(N)x_r(N) \end{bmatrix} \in R^{N \times [(r+1) \times L]} \quad (18)$$

ماتریس X را به مقادیر تکین تجزیه می‌کنیم برای این کار در Matlab از SVD²⁷ (تجزیه مقادیر تکین) استفاده می‌کنیم. با اعمال SVD به ماتریس بالا داریم:

$$X = U \Sigma V^T \quad (19)$$

که در آن:

$$U = [u_1, u_2, \dots, u_n] \in R^{N \times N} \text{ و } V = [v_1, v_2, \dots, v_{(r+1) \times L}] \in R^{[(r+1) \times L] \times [(r+1) \times L]}$$

ماتریس‌های مربعی و یکانی^{۲۸} هستند و

$$\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{(r+1) \times L}) \in R^{N \times [(r+1) \times L]}$$

یک ماتریس قطری^{۲۹} با $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_{(r+1) \times L} \geq 0$ می‌باشد.

با جایگذاری (۱۹) در (۱۷) و دستکاری جبری ساده و کوچکترین حل نرم اقلیدسی ضرایب b به صورت زیر به دست می‌آید:

$$b = \sum_{i=1}^s \frac{u_i^T d}{\delta_i} \quad (20)$$

که s تعداد مقادیر استثنایی غیر صفر در Σ است.

۳-۳- شبیه سازی کنترل کننده فازی نوع TSK

فرآیند مورد مطالعه در محیط سیمولینک Matlab در شکل (۶) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی از پیل سوختی پلیمری با توان ۱.۲ کیلووات در متلب استفاده شده است. مشخصات پیل سوختی پلیمری استفاده شده در جدول (۱) داده شده است. باطری مورد استفاده از جنس نیکل کادمیوم با ولتاژ ۵۵ ولت و شارژ اولیه ۵۰٪ می‌باشد

τ_i قدرت آتش کردن^{۲۲} قاعده‌ی R_i است که به صورت ضرب یا مینیمم تعریف می‌گردد و w_i قدرت آتش نرمالیزه شده است. مثلاً:

$$\tau_i = A_{i1}(x_1) * A_{i2}(x_2) * \dots * A_{ir}(x_r) \quad (13)$$

$$w_i = \frac{\tau_i}{\sum_{i=1}^L \tau_i} \quad (14)$$

با توجه به خروجی مدل می‌توان الگوریتم‌های شناسایی مختلف برای شناسایی پارامترهای مجهول در آن استفاده کرد.

در مرجع [۱۶] سه الگوریتم یادگیری برای به دست آوردن پارامترهای مجهول در مدل TSK بیان شده است. وظیفه الگوریتم‌های یادگیری تخمین پارامترهای سیستم است به گونه‌ای که به عملکرد مناسب سیستم دست یابیم. الگوریتم‌های یادگیری مطرح شده در این مقاله یادگیری کلی^{۲۳}، یادگیری محلی^{۲۴} و ترکیب شده^{۲۵} نام دارند. در هر کدام از این الگوریتم‌ها دارای تابع هدف خاصی می‌باشند. با توجه به نتایج عملکرد این الگوریتم‌ها در [۱۶] اگر ضرایب مجهول در TSK با الگوریتم کلی به دست آیند سیستم دارای عملکرد ردیابی کلی خوبی می‌باشد اما ممکن است در نقاط آموزشی خاص و مراکز توابع عضویت دارای خطا باشد. تابع هدف مینیمم شده در این الگوریتم به صورت معادله‌ی (۱۵) می‌باشد.

$$J_G = \sum_{k=1}^N [d(k) - y(k)]^2 \quad (15)$$

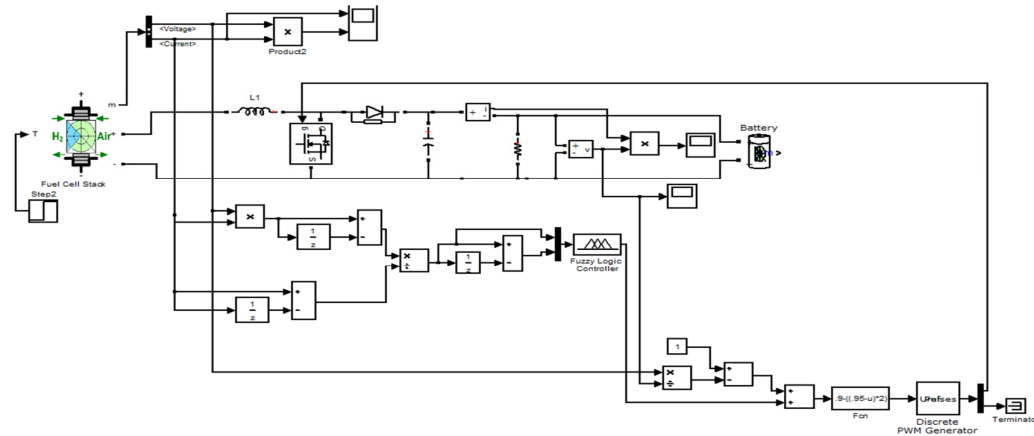
در تابع بالا $d(k)$ خروجی سیستم واقعی و $y(k)$ خروجی سیستم شناسایی شده است. N تعداد داده‌های آموزشی است. اگر قواعد کافی و داده‌های آموزشی کافی استفاده گردد همگرایی سیستم تضمین می‌گردد.

ضرایب الگوریتم مثبت و ثابت هستند و توسط استفاده کننده و بر حسب اینکه استفاده کننده عملکرد کلی یا عملکرد محلی بهتری را می‌خواهد انتخاب می‌گردند. از آن جا که هدف ردیابی کلی نقطه‌ی ماکزیمم توان است، در این مقاله از الگوریتم کلی برای محاسبه‌ی ضرایب b استفاده شده است. از الگوریتم محلی و ترکیب شده در مواردی که نیاز به دقت بیشتر است استفاده می‌گردد.

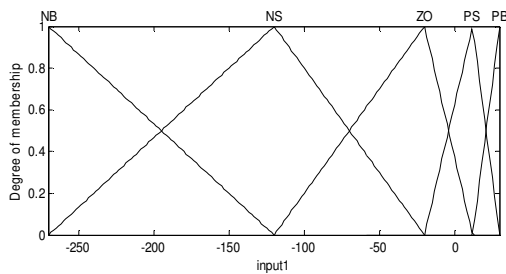
۳-۲-۱- الگوریتم کلی

روش بسیار رایج برای به دست آوردن پارامترهای b الگوریتم RLS²⁶ یا حداقل مربعات بازگشتی است. مزیت این روش توانایی یادگیری آنلاین آن می‌باشد اما این الگوریتم به تعداد زیادی تکرار نیاز دارد. در اینجا یک روش محاسباتی کارآمد و غیر تکراری برای محاسبه‌ی ضرایب b ارائه می‌گردد. این ضرایب را به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌کنیم.

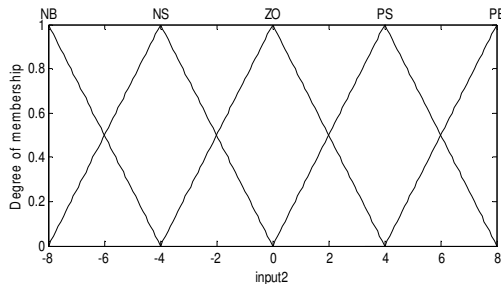
$$b = [b_{10} \ b_{11} \ \dots \ b_{1r} \ \dots \ b_{L0} \ b_{L1} \ \dots \ b_{Lr}]^T \in R^{(r+1) \times L} \quad (16)$$



شکل(۶): شکل کلی سیستم مورد مطالعه در سیمولینک متلب
Fig. (6): General shape of studid system in MATLAB simulink



شکل (۷): توابع عضویت ورودی خطا
Fig. (7): Membership function of error input



شکل (۸): توابع عضویت تغییرات خطا
Fig. (8): Membership function of error changes

Table(1): characteristic of used fuel cell
جدول (۱): مشخصات پیل سوختی مورد استفاده

مقدار	واحد	مشخصه
1259.96	W	توان نامی خروجی
2000	W	توان ماکزیمم خروجی
.061871	Ω	مقاومت پیل سوختی
1.115	V	ولتاژنرس
99.92	%	درصد اکسیژن مصرفی
1.813	%	درصد هیدروژن مصرفی
96485	As/mol	F
8.3145	J/(mol K)	R
12.2	Lpm	نسبت جریان سوخت نامی
23.46	Lpm	نسبت جریان سوخت ماکزیمم
2400	Lpm	نسبت جریان سوخت نامی هوا
4615	Lpm	نسبت جریان سوخت ماکزیمم هوا
328	K	دما
1.5	Bar	فشار سوخت
1	Bar	فشار هوا

همچنین در این مقاله یک مبدل پوست با مشخصات زیر طراحی شده است:

$$V_i = 24v, V_o = 60v, \Delta V_o = 1\%, f_{sw} = 20KHz, \Delta I_L = 2A \quad (21)$$

بار داری توان 1.2KW است در نتیجه:

$$I_o = \frac{1200}{60} = 20A \quad (22)$$

با توجه به روابط چاپر در [۱۵]:

$$L \geq \frac{24 \cdot 4}{20000} = .1mH \quad (23)$$

$$C \geq \frac{.4 \cdot 20}{20000 \cdot 55} = 7.2 \cdot 10^{-4}F \quad (24)$$

برای شبیه سازی کنترل کننده TSK قواعد فازی به صورت زیر هستند که در قسمت If-Part توابع عضویت به صورت شکل (۷) و (۸) تعریف می گردند. خروجی یک تابع خطی است که ضرایب آن با استفاده از الگوریتم آموزشی معرفی شده در بخش (۳-۲-۱) به دست می آید.

$$\text{If } E \text{ is } A_{i1} \text{ and CE is } A_{i2} \text{ Then } y_i = b_{i0} + b_{i1}E + b_{i2}CE$$

شرایط اعمالی به سیستم جهت شبیه سازی در جدول (۲) آمده است. ردیابی ماکزیمم توان در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل I(PEMFC) جریان خروجی پیل سوختی پلیمری، P(PEMFC) توان خروجی پیل سوختی پلیمری و V(Load)، ولتاژ بار را نشان می دهد. این نتایج عملکرد مناسب سیستم را برای تعقیب افزایش دما نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با تغییر مقاومت همچنان توان ماکزیمم ردیابی می شود و با افزایش دما در زمان Is. توان افزایش یافته است. همچنین شکل (۱۰) و (۱۱) مقایسه عملکرد کنترل کننده فازی و P&O را نشان می دهد. مقایسه عملکرد این دو کنترل کننده نشان می دهد، کنترل فازی نوع TSK دارای سرعت بالاتر و نوسان کمتر و دقت بیشتری نسبت به نوع P&O می باشد.

Table (2): System condition for analysis in different times

جدول (۲): شرایط سیستم جهت تحلیل در زمانهای مختلف

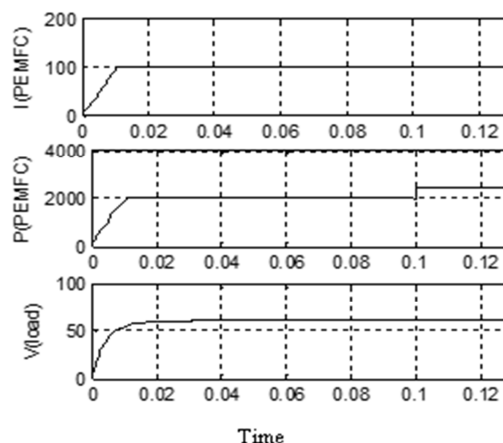
مقاومت(اهم)	دما (کلوین)	بازه زمانی(ثانیه)
5	328	0-0.03
20	328	0.03-0.06
15	328	0.06-0.1
1	350	0.1-0.13

۴- نتیجه گیری

در این مقاله هدف ردیابی توان ماکزیمم پیل سوختی ۱/۲ کیلووات می باشد. برای این منظور از یک چاپر بین پیل سوختی و بار استفاده گردید، که با تنظیم سیکل کاری موج اعمالی به چاپر می توان مشخصه پیل سوختی را در نقطه کار بهینه قرار داد. برای تولید سیگنال مدولاسیون پهنای پالس از کنترل فازی نوع TSK استفاده گردید. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب این کنترل کننده را در تعقیب نقطه ماکزیمم توان نشان می دهد. همچنین روش P&O نیز بررسی شد. همان طور که مشاهده می گردد هر دو الگوریتم شبیه سازی شده در تعقیب نقطه ماکزیمم توان موفق عمل کرده اند. اما الگوریتم فازی دارای زمان نشست کمتری و در نتیجه سرعت بیشتری بوده و نوسانات خروجی کمتری دارد.

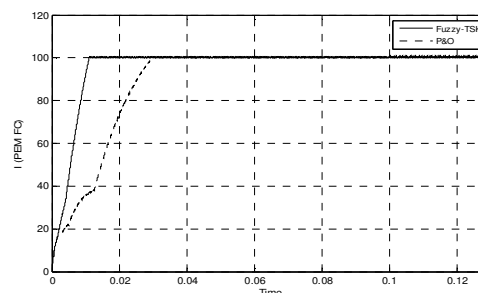
پی نوشت:

- 1- Takagi Sugeno Kang
- 2- Polymer Fuel Cell
- 3- Maximum power point tracking
- 4- Perturbance and observation
- 5- Incremental conductance
- 6- Fractional open circuit voltage
- 7- Fractional short circuit current
- 8- Fuzzy logic controller
- 9- Neural network
- 10- Ripple correlation control
- 11- Current sweep
- 12- DC-link capacitor droop control
- 13- Load current and load voltage maximization
- 14- Sliding mode control
- 15- Chattering
- 16- Particle Swarm Optimization
- 17- Polarization
- 18- Activation Region
- 19- Ohmic Region
- 20- Mass Transport Region
- 21- Representation Power
- 22- Firing Strength
- 23- Global Learning
- 24- Local Learning
- 25- Combined Learning
- 26- Recursive Least-Squares
- 27- Singular Value Decomposition
- 28- Unitary:(A is a unitary matrix $\leftrightarrow A^H = A^T$ that H is Hermision symbol and T is transpose)
- 29- Diagonal Matrix

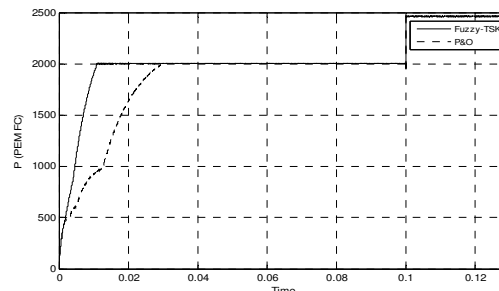


شکل (۹): پاسخ سیستم کنترل فازی نوع TSK با ۲۵ قاعده

Fig. (9): System response of Tsk fuzzy control with 25 rules



شکل (۱۰): مقایسه ردیابی جریان ماکزیمم در کنترل کننده فازی و P&O
Fig. (10): Comparison of maximum current tracking in fuzzy control and P&O



شکل (۱۱): مقایسه ردیابی توان ماکزیمم در کنترل کننده فازی و P&O
Fig. (11): Comparison of maximum power tracking in fuzzy control and P&O

References

- [1] A.H. Fathi, S. Hoseinnia, R. Roshandel. "A novel isolated DC/DC converter for fuel cell powered load , IEEE/ EPEC, pp. 1-6, Montreal, QC, 22-23 Oct. 2009.
- [2] T. ESRAM, P.L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, Issue 2, pp. 439-449, 2007.
- [3] A. Al Nabulsi, R. Dhaouadi, "Fuzzy logic controller based perturb and observe maximum power point tracking", ICREPQ, Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012.
- [4] A. Giustiniani, "Enhancing polymeric electrolyte membrane fuel cell control by means of the perturb and observe technique", Fuel Cell Sci Technol, Journal of Fuel Cell Science and Technology , American Society of Mechanical Engineers, pp. 11021-11031, 2010.
- [5] C.A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, G. Petrone, R. Giral, A. Romero, "Fuel cell MPPT for fuel consumption optimization", IEEE/ ISCAS, pp. 2199 – 2202, Paris, 2010.
- [6] Sh. Abdi, K. Afshar, N. Bigdeli, S. Ahmadi, "A novel approach for robust maximum power point tracking of PEM fuel cell generator using sliding mode control approach", Int. Jou. Elec. Sci., pp. 4192 – 4209, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, 2012.
- [7] F.A. Inthamoussou, R.J. Mantz, Hernán De Battista, "Flexible power control of fuel cells using sliding mode techniques", Jou. of Power Sources, Elsevier, Vol. 205, pp. 281-289, 1 May 2012.
- [8] Y.H Liu, Chun-Liang Liu, Jia-Wei Huang, Jing-Hsiau Chen, "Neural-network-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments", Solar Energy, Sciencedirect, Vol. 89, pp. 42–53, National Taiwan University of Science and Technology, March 2013.
- [9] S. Rahman, "Two-loop controller for maximizing performance of a grid-connected photovoltaic-fuel cell hybrid power plant", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 13, Issue 3, pp. 276-281, Sep. 1998.
- [10] I. Soltani, M. Sarvi, H. Marefatjou, "An intelligent, fast and robust maximum power point tracking for proton exchange membrane fuel cell", World Applied Programming, Vol. 3, Issue 7, pp. 264-281, July 2013.
- [11] C. Spiegel, "PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB", Elsevier, chapter 7, pp. 197-241, 2008.
- [12] Liping Fan, Jun Zhang, Yi Liu, Xiaolin Shi, "Improved model predictive control for a proton exchange membrane fuel cell", Int. Jou. Electrochem. Sci., pp. 8734 – 8744, 2012.
- [13] A. Reza zadeh, M. Sedighzadeh, M. Karimi, "Proton exchange membrane fuel cell control using a predictive control based on neural network", Int. Jou. of Com. and Elect. Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 81-85, Singapore, 2010.
- [14] P.C. Chen, "Robust voltage tracking control for proton exchange membrane fuel cells", Energy Conversion and Management, Vol. 65, pp. 408-419, Jan. 2013.
- [15] M.H. Rashid, "Power electronics handbook", Second ed, Elsevier, chapter 13, pp. 245-259, 2011.
- [16] J. Yen, L. Wang, Ch. Wayne Gillespie, "Improving the Interpretability of TSK Fuzzy Models by Combining Global Learning and Local Learning", IEEE Trans. on Fuzzy Sys., Vol. 6, Issue 4, pp. 530-537, Texas A&M University, College Station, 1998.