



یک استراتژی جدید برای کنترل توان اکتیو و راکتیو نیروگاه پیل سوختی متصل به شبکه توزیع الکتریکی

کاظم زارع، علیرضا حاتمی، دکتر مصطفی محمدیان
دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، بخش برق، گروه قدرت

کلید واژه: نیروگاه پیل سوختی، کنترل، توان اکتیو، توان راکتیو

چکیده:

گسترش روزافزون منابع تولید پراکنده سبب توجه به آنها و آنالیز عملکرد آنها شده است. نیروگاه پیل سوختی در میان منابع تولید پراکنده، دارای جایگاه ویژه ای می باشد. یکی از مسائل مهم این نوع نیروگاهها، چگونگی کنترل توان اکتیو و راکتیو تولیدی با توجه به تقاضای شبکه می باشد. در تحقیقات انجام شده در این زمینه، روشهای کنترل توان اکتیو و راکتیو در بهبود پایداری گذرا- با استفاده از کنترل اینورتر- مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله یک استراتژی جدید برای کنترل توان اکتیو و راکتیو نیروگاه پیل سوختی متصل به شبکه توزیع الکتریکی مبتنی بر کنترل همزمان دبی سوخت و اینورتر ارائه می شود.

۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از منابع تولید پراکنده، انتظار می رود این منابع نقش مهمی در تولید توان در آینده ایفا نمایند. نیروگاههای پیل سوختی یکی از منابع مهم تولید

پراکنده می باشند که در شبکه های توزیع الکتریکی استفاده می شوند. به علت بازدهی بالا و آلودگی محیطی کم این نوع نیروگاهها، استفاده از آنها روبه فزونی می باشد [۱]. پیلهای سوختی از نظر جنس صفحات کاتد و آنود و ماده الکترولیت دارای انواع مختلفی می باشند؛ از انواع مختلف پیلهای سوختی، نوعهای کربن مذاب (MCFC) و اکسید جامد (SOFC) به علت توان بالایشان در نیروگاههای پیل سوختی استفاده می شوند [۲]. در این مقاله نیز نیروگاه پیل سوختی نوع اکسید جامد مورد تحلیل قرار می گیرد.

برای بررسی دینامیک پیلهای سوختی، شبیه سازی دینامیکی فرایندهای شیمیایی ضروری می باشد زیرا دینامیک فرایندهای شیمیایی تاثیر مستقیمی در دینامیک الکتریکی پیلهای سوختی دارند [۳]. هر یک از انواع پیلهای سوختی دارای دینامیک مشخصی می باشند؛ برخی دارای دینامیک سریع و برخی دارای دینامیک کند. مقالات متعددی به شبیه سازی دینامیک فرایندهای شیمیایی و حرارتی پیل سوختی نوع اکسید جامد پرداخته اند [۱، ۴، ۵]. از آنجا که در دینامیک الکتریکی پیلهای سوختی، دینامیک حرارتی به علت ثابت زمانی بسیار

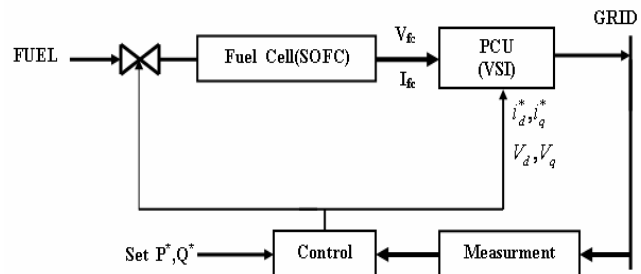
زیاد، تاثیر بسیار کمی دارد؛ در این مقاله، تنها تاثیر دینامیک فرایندهای شیمیایی مد نظر قرار گرفته و شبیه‌سازی می‌شود. توان خروجی یک پیل سوختی بصورت «توان DC» می‌باشد. برای اتصال پیل سوختی به شبکه توزیع، به یک مبدل توان^۱ (PCU) نیاز می‌باشد. مبدل توان از یک مبدل DC-DC و یک اینورتر تشکیل شده است.

مقالات متعددی به بررسی تاثیر نیروگاه پیل سوختی در بهبود پایداری گذرای شبکه های توزیع پرداخته اند [۶ و ۷]. در این مقالات استراتژی کنترل، با توجه به ماهیت مسئله، تنها روی اینورتر موجود در مبدل توان متمرکز شده است. مرجع [۸] نیز به بحث کنترل توان اکتیو و راکتیو یک پیل سوختی نوع PEM^۲ مجزا از شبکه توزیع، که برای مصارف خانگی مناسب می‌باشد، پرداخته است. در این مقاله روشی جدید برای کنترل توان اکتیو و راکتیو یک نیروگاه پیل سوختی متصل به شبکه توزیع ارائه می‌شود.

در این مقاله یک استراتژی جدید برای کنترل توان اکتیو و راکتیو نیروگاه پیل سوختی متصل به شبکه توزیع الکتریکی، مبتنی بر کنترل همزمان دبی سوخت و اینورتر ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک نیروگاه پیل سوختی

یک نیروگاه پیل سوختی، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، از قسمتهایی همچون مجموعه پیل‌های سوختی سری- موازی، PCU، و واحد کنترل و اندازه گیری تشکیل شده است. در ادامه، به شبیه‌سازی هر یک از قسمت‌ها پرداخته می‌شود.



شکل (۱): شمای کلی یک نیروگاه پیل سوختی

در مرجع [۴] مدلی برای شبیه‌سازی پیل سوختی نوع SOFC ارائه شده است. در این مقاله از مدل مذکور استفاده شده است که در شکل (۲) آورده شده است. پارامترهای مدل ذکر شده عبارتند از:

q_{H_2}, q_{O_2} : بترتیب دبی مولاریته ورودی هیدروژن و اکسیژن بر حسب [Kmol/s]

$P_{H_2O}, P_{H_2}, P_{O_2}$: بترتیب فشارهای جزئی هیدروژن، اکسیژن و آب بر حسب [atm]

$K_{H_2O}, K_{O_2}, K_{H_2}$: بترتیب ثابت مولاریته شیر هیدروژن، اکسیژن و آب بر حسب [Kmol/atm]

N_0 : تعداد پیل‌های سوختی سری شده در یک مجموعه

I : جریان یک مجموعه پیل سوختی بر حسب [A]

F : ثابت فارادی بر حسب [C/Kmol]

R : ثابت عمومی گازها بر حسب [1 atm/(Kmol K)]

T : درجه حرارت پیل سوختی بر حسب [K]

K_r : ثابت مدل بر حسب [Kmol/SA]

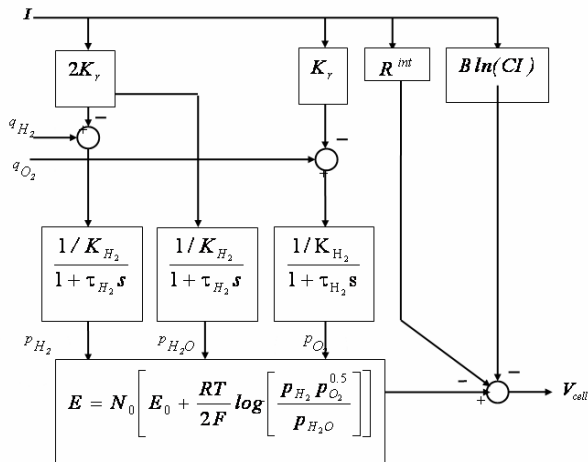
R^{int} : مقاومت داخلی مجموعه پیل سوختی بر حسب [Ω]

B, C : ثابتهایی برای مدل‌سازی افت ولتاژ ناشی از فعالیت پیل سوختی بترتیب بر حسب [V] و [A^{-1}]

$\tau_{H_2}, \tau_{O_2}, \tau_{H_2O}$: بترتیب ثابت زمانهای هیدروژن، اکسیژن و آب بر حسب [s]

V_{cell} : ولتاژ خروجی DC نیروگاه پیل سوختی بر حسب [V]

E_0 : ولتاژ بی باری یک پیل سوختی بر حسب [V]



شکل (۲): بلوک دیاگرام یک پیل سوختی

۲-۲- مدل‌سازی مبدل توان

همانطور که گفته شد، PCU برای تبدیل ولتاژ DC نیروگاه پیل سوختی به ولتاژ AC استفاده می‌شود. PCU شامل یک مبدل

۲-۱- مدل پیل سوختی

- 1- Power Conditioning Unit
- 2- Proton-Exchange-Membrane

۲- کنترل توان اکتیو و ولتاژ خروجی نیروگاه (باس متصل به نیروگاه، باس PV در نظر گرفته می‌شود).

با کنترل اندیس مدولاسیون دامنه اینورتر می‌توان ولتاژ خروجی باس نیروگاه پیل سوختی و در نتیجه توان راکتیو تزریقی به شبکه را کنترل نمود. بنابراین استراتژی کلی کنترل ولتاژ خروجی و توان راکتیو یکی می‌باشد. همچنین با کنترل زاویه بین ولتاژ و جریان خروجی نیروگاه، بوسیله اینورتر، می‌توان توان اکتیو خروجی پیل سوختی را کنترل نمود، اما در هنگام تغییر توان خروجی پیل سوختی قیود ذیل، برای جلوگیری از آسیب دیدن پیل سوختی و امکان اتصال آن به شبکه، بایستی برآورده شوند.

الف: ضریب بهره برداری پیل سوختی در محدوده $0.7 \leq U \leq 0.9$ باقی بماند.

ب: ولتاژ DC پیل سوختی در محدوده مجاز باقی بماند و بیش از حد افت نکند (افت ولتاژ بیش از حد سبب عدم اتصال آن به شبکه می‌شود).

قیود ذکر شده باعث می‌شود که از اینورتر تنها برای تنظیم تغییرات لحظه ای کوچک توان اکتیو نیروگاه یا کنترل توان نیروگاه، برای بهبود پایداری گذرای سیستم، بتوان استفاده نمود [۷]. در مواجه با حالت‌های ماندگار و دینامیکی، می‌بایستی همزمان با کنترل توان اکتیو اینورتر، به کنترل دبی سوخت ورودی به پیل سوختی نیز اقدام کرد و توان اکتیو اینورتر متناسب با توان تولید شده در پیل سوختی تنظیم شود تا قیود مربوط به بهره برداری از نیروگاه پیل سوختی نقض نشود.

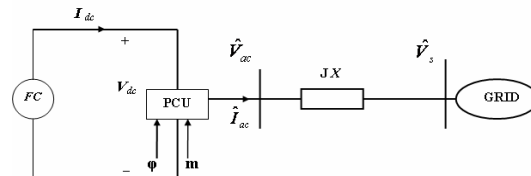
فرایند شیمیایی تولید گاز هیدروژن، فرایند کندی می‌باشد. در شبیه‌سازی انجام شده، این فرایند بایک تابع انتقال درجه یک با ثابت زمانی ۵ ثانیه مدل می‌شود [۱۰]. اما فرایند تولید الکتریسیته در پیل سوختی سریع می‌باشد و متناظر با سرعتیست که واکنش‌های شیمیایی قادر به بازبایی بارهای کشیده از پیل سوختی بوسیله بار می‌باشند. این فرایند نیز با یک تابع انتقال درجه یک با ثابت زمانی 0.8 ثانیه مدل می‌شود [۱۰]. با توجه به مطالب ذکر شده بلوک دیاگرام سیستم

کنترلی پیشنهاد شده برای کنترل دبی سوخت ورودی در شکل (۵) و برای کنترل اینورتر در شکل (۶) رسم شده است. در این شکلها P_{ref} : توان اکتیو مرجع (مقدار توانی که پیل سوختی بایستی توان خود را به آن سطح برساند)؛ P_{cal} : توان اکتیو لحظه‌ای خروجی پیل سوختی؛ Q_{ref} : توان راکتیو مرجع؛ T_e : ثابت زمانی متناظر با تولید سوخت (هیدروژن) در پیل سوختی؛ T_c : ثابت زمانی متناظر با تولید بارهای الکتریکی در پیل

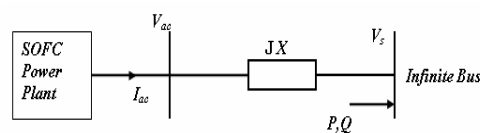
DC-DC برای افزایش ولتاژ باس DC می‌باشد که به دنبال آن یک اینورتر سه فاز برای تبدیل ولتاژ DC به AC قرار می‌گیرد. از اینورتر برای کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی پیل سوختی می‌توان استفاده کرد؛ همچنین علاوه بر تنظیم ضریب توان، از اینورتر می‌توان برای کنترل و نگهداری هارمونیک‌های جریان در سطح کم استفاده نمود. این کار بسادگی بوسیله یک اینورتر منبع ولتاژ با مدولاسیون پهنای پالس (PWM-VSI) امکان پذیر است [۹]. با توجه به اینکه ثابت زمانی پاسخ اینورتر در حد چند میلی‌ثانیه می‌باشد، با تقریب بسیار خوب می‌توان از آن در مقابل دینامیک کند فرایندهای شیمیایی پیل سوختی صرف نظر نمود. در این مقاله برای مدلسازی اینورتر از یک مدل ساده ارائه شده در [۷] استفاده می‌شود؛ بطوریکه ولتاژ خروجی به وسیله اندیس مدولاسیون دامنه اینورتر (m) و زاویه فاز (φ)، زاویه بین ولتاژ و جریان اینورتر، کنترل می‌شود. شکل‌های (۳) و (۴) یک نیروگاه پیل سوختی را نمایش می‌دهند که از طریق یک خط انتقال (که می‌تواند شامل یک ترانسفورماتور هم باشد) به یک شبکه وصل شده است. روابط بین جریان و ولتاژ DC (در سمت پیل سوختی) و AC (در سمت شبکه) عبارتند از:

$$\hat{V}_{ac} = m \cdot V_{dc} \angle \delta = V_{ac} \angle \delta \quad (1)$$

$$I_{dc} = m \cdot I_{ac} \cdot \cos(\varphi) \quad (2)$$



شکل (۳): نمایش ساده یک PCU در نیروگاه پیل سوختی



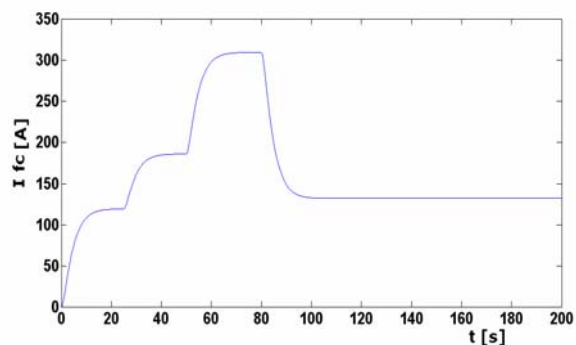
شکل (۴): دیاگرام تک خطی نیروگاه پیل سوختی متصل به شین بی نهایت

۲-۳- واحد کنترل و اندازه‌گیری

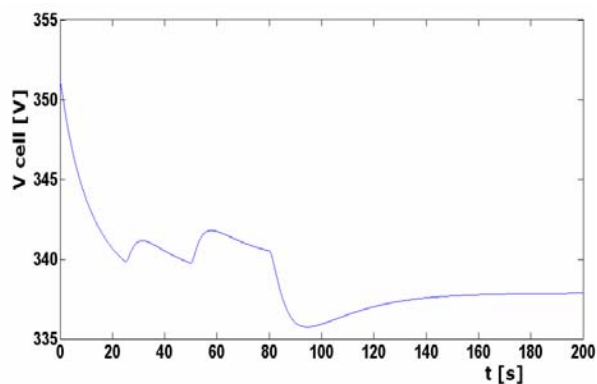
برای کنترل نیروگاه پیل سوختی دو استراتژی می‌توان انتخاب کرد:

۱- کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی نیروگاه (باس متصل به نیروگاه، باس PQ در نظر گرفته می‌شود).

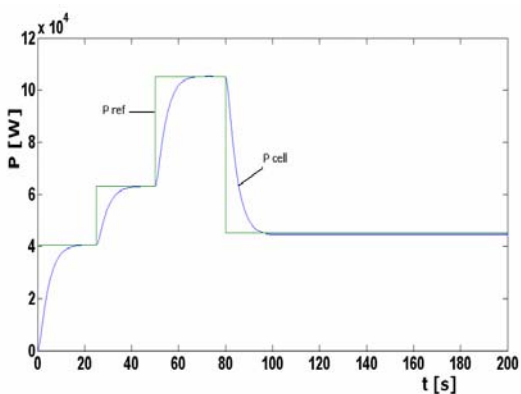
سرعت بالایی می‌تواند تغییرات توان راکتیو مرجع را دنبال کند



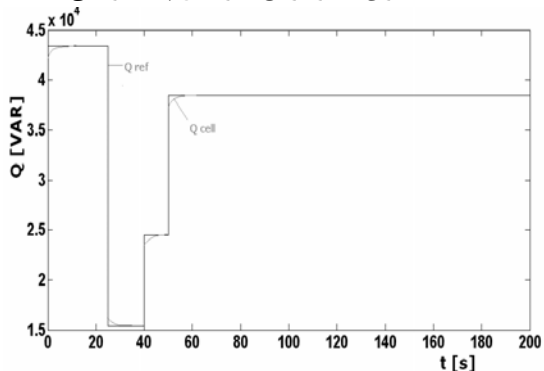
شکل (۷): جریان DC پیل سوختی



شکل (۸): ولتاژ DC پیل سوختی

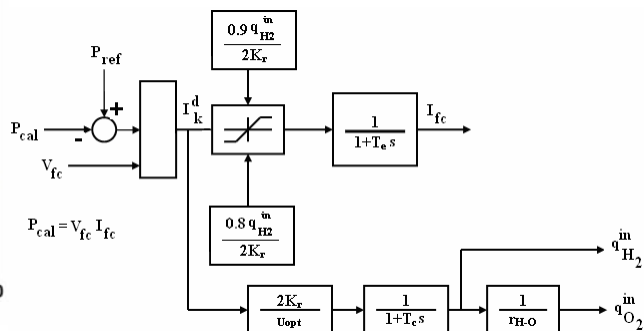


شکل (۹): توان اکتیو مرجع و تولیدی پیل سوختی

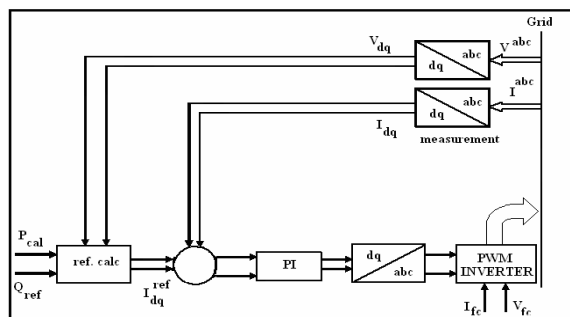


شکل (۱۰): توان راکتیو مرجع و تولیدی پیل سوختی

سوختی؛ T_{H-O} : نسبت دبی هیدروژن به اکسیژن و U_{opt} : ضریب بهره‌برداری پیل سوختی می‌باشند.



شکل (۵): بلوک دیاگرام سیستم کنترل دبی سوخت نیروگاه پیل سوختی برای کنترل P-Q



شکل (۶): بلوک دیاگرام سیستم کنترل اینورتر برای کنترل P-Q

۳- شبیه‌سازی یک سیستم نمونه

برای بررسی نحوه عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهاد شده، یک نیروگاه پیل سوختی متصل به شین بی نهایت در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای نیروگاه پیل سوختی و همچنین پارامترهای سیستم، در مرجع [۱] بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۷-۱۰) رسم شده است. شکل (۷)، تغییرات ولتاژ DC پیل سوختی را نشان می‌دهد. در شکل (۸)، جریان کشیده شده از پیل سوختی نشان داده شده است. در شکل (۹) توان اکتیو مرجع و پیل سوختی رسم شده است و در شکل (۱۰)، توان راکتیو مرجع و نیروگاه پیل سوختی. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، توان اکتیو تولیدی نیروگاه با مقداری تاخیر، که ناشی از ثابت زمانیهای مربوط به تولید سوخت و تولید بارهای الکتریکی در پیل سوختی می‌باشد، تغییرات توان اکتیو مرجع را دنبال می‌کند. همچنین توان راکتیو تولیدی نیروگاه، با دقت بسیار خوبی، توان راکتیو مرجع را دنبال می‌کند زیرا پاسخ زمانی اینورتر بسیار کم می‌باشد و با

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا فرایندهای شیمیایی یک نیروگاه پیل سوختی نوع اکسید جامد شبیه‌سازی شد. با توجه به محدودیت‌های بهره برداری از این نیروگاه‌ها، استراتژی کنترلی برای کنترل همزمان دبی سوخت ورودی و اینورتر، به منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو نیروگاه ارائه گردید؛ سپس استراتژی کنترل پیشنهاد شده روی یک سیستم نمونه شبیه‌سازی شده است و نتایج بدست آمده بیانگر کارا و موثر بودن استراتژی پیشنهاد شده در کنترل توان اکتیو و راکتیو، برای حالت‌های مانا و دینامیکی، می‌باشد.

۵- منابع

- [4] J. Padulles, "An integrated SOFC plant dynamic Model for power system simulation," J. Power Sources, Vol. 86, PP. 495-500.
- [5] E. Achenbach, "Response of a solid oxide fuel cell to load change," J. Power Sources, Vol. 57, PP. 105-109.
- [6] K. Sedghisigarchi and A. Feliachi, "Dynamic and transient analysis of power distribution system with fuel cells-part II: fuel-cell dynamic model," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, 2004.
- [7] C. J. Hatziaioniu, A. A. Lobo, F. Pouboghrat and M. Daneshdoost, "A simplified dynamic model of grid connected fuel-cell generators," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 2, 2002.
- [8] M. Y. El-Sharkh, et al, "Analysis of Active and Reactive Power Control of a Stand-Alone PEM fuel cell power plant", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 19, No.4, 2004.
- [9] P. G. Barbosa, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe and R. Hanitsch, "Control Strategy for grid-connected DC-AC converters with load factor correction", IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 5, 1998.
- [10] F. Jurado, "Enhancing the distribution networks stability using distributed generation", Int. J. for Computation and Maths. In Electric and Electronic Eng., Vol. 24, No. 1, 2005.
- [1] K. Sedghisigarchi and A. Feliachi, "Dynamic and transient analysis of power distribution system with fuel cells-part I: fuel-cell dynamic model," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, 2004.
- [2] R. Anhana, S. Yokokawa and M. Sakurai, "Present status and future proposes for fuel cell power systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 81, 1993.
- [3] D. J. Hall and R. G. Colclaser, "Transient modeling and simulation of tubular solid oxide fuel cell", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, PP. 749-753, 1999.