光伏-燃料电池混合发电系统建模与仿真

刘畅，陈启卷，陈桂月，车孝轩

（武汉大学动力与机械学院，武汉430072）

摘要：建立一种家居光伏-燃料电池混合发电系统，该系统由光伏发电装置、燃料电池/超级电容、电解池、氢存储装置以及功率调节单元等组成。因光伏发电受日照变化影响，因此采用燃料电池与超级电容相结合与光伏装置配合发电可保证混合发电系统供电的稳定性和可靠性。以武汉地区日照强度和家居用电为例，在Matlab/Simulink软件中对该系统进行了仿真，结果表明该混合发电系统可以满足普通家居用电需求。

0引言

近几年在国家的鼓励政策及世界范围内光伏行业蓬勃发展的背景下，太阳能光伏发电得到越来越广泛的研究和应用。特别是随着太阳电池板的成本和造价的逐渐降低，其在家居用电系统中的应用也得到推广与普及。随着现代科技发展和社会进步，人们的住房观念和需求已发生根本性变化，居住条件已成为现代居民生活质量的重要标志，因此以“高质量、低能耗”为基本特征的新型住宅将会成为以后住宅产业的发展方向[1]。然而，太阳能能量密度低，且光伏系统供电受到季节与气象条件影响，单一的太阳能发电难以满足家居负载要求。

为满足家居用电稳定连续的需求，将太阳能和燃料电池结合，并以制氢储能方式代替传统的蓄电池储能环节将具有良好的发展前景。在该“光伏-燃料电池（氢能）混合发电系统”中，光伏发电除提供给负载外，多余的电能可用来电解水制氢并储存；当光伏发电系统不能满足供电需求时，燃料电池可利用储存的氢气发电。这样的混合发电系统可提高能源的利用效率，减少化石燃料的消耗，环境友好、清洁节能，并且在太阳能和燃料电池工作时其低噪声特性保证了该混合系统可安装在负载附近或中心，不会影响居民的正常工作与休息[2]，可实现现代家居用电高质低耗、安全可靠的目标。基于以上分析，本文提出一种用于家居的光伏-燃料电池混合发电系统，并在Matlab/Simulink中建立系统的仿真模型，对其性能进行分析。

1混合系统结构及运行方式

1.1混合系统结构

本文提出的应用于家居的光伏-燃料电池混合发电系统的结构[3]如图1所示，该系统主要包括太阳电池阵列、燃料电池/超级电容、电解池、氢存储装置、可控制的升压型直流变流器（boost converter）、直流/交流逆变器（IGBT）以及变压器等。

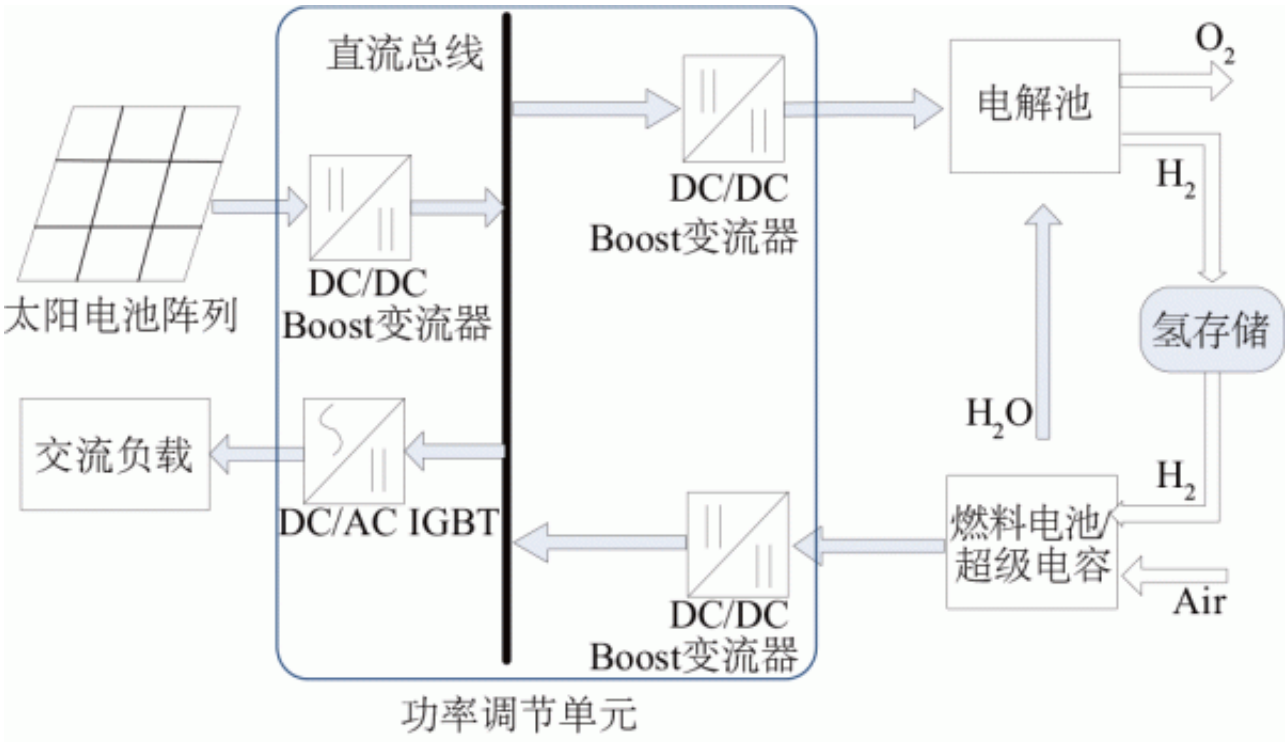


图1　光伏-燃料电池混合发电系统结构

Fig. 1　Structure of PV-fuel cell hybrid power system

在该系统中，太阳电池阵列是核心部分，它将太阳能直接转化为电能供负载使用，其余电能供给电解池电解水制氢，产生的氢气存储在储氢罐里，供给燃料电池使用。

以燃料电池作为后备电源代替传统光伏发电系统中使用蓄电池储能并提供电能的方式具有很大优势，首先，燃料电池的发电效率主要取决于电解质，且燃料储存在电池外部，因此其发电效率不会受到电池容量的限制，而蓄电池自身的发电效率虽然较高，但经过电能转换时会发生能量损失使效率严重下降，且电池中的化学能储存在电池正负极，发电效率会受到电池容量的影响；其次，燃料电池在满负荷时具有很高的电能转化效率，即使负载减小仍能保持高效的转化率，而蓄电池会在放电时电压减小、效率降低，难以满足居民用电发生变化时的需求；最后，燃料电池比蓄电池更易操作，且不会对环境造成污染，更适宜作为光伏发电系统的辅助发电。虽然燃料电池在稳态运行中具有较好的供电性能，但考虑到其对于瞬间和短期内峰值功率的响应相对较弱[4]，有学者提出可将超级电容与其串联，在低功率要求时，燃料电池向负载供电后的剩余电能可由超级电容储存；而在高功率要求时，燃料电池产生额定的功率，同时，超级电容放电来满足负载需求，这样可使燃料电池在不增加成本和尺寸的基础上获得更好的性能。

功率调节单元包括升压型直流变流器、直流/交流逆变器等，主要负责调节系统输出理想的电压和功率供给居民使用。由于太阳电池输出电流随温度和光照强度的变化而改变，燃料电池因自身特性使得其输出电压为不可控的低压直流电[4]，因此可通过直流变流器或直流/交流逆变器将电池输出电压调整为满足家居用电稳定性需求的直流或交流电。

1.2系统的运行方式

根据各电源、环境以及居民用电情况可为系统拟定3种工作模式：

1）白天模式，即在光照充足的白天，太阳能供电足够满足居民用电需求，多余的电能供给电解池电解水制氢存储起来，以备燃料电池使用；

2）夜间模式，即在光照不充足的白天和夜间，太阳能供电不足时，由燃料电池协同光伏发电向负载提供电能；

3）连续阴雨天模式，即当遇到连续阴雨天气，系统不能满足家居用电需求时，可由电网供电。

2系统发电量及负荷的计算

2.1光伏发电系统容量设计

光伏发电系统的容量是以系统所在地区的太阳能日均辐射强度和居民的日耗电量等因素为依据确定的，光伏发电系统的容量可由式(1)和式(2)确定：

$$A_{pv}=\frac{E_{Ld}}{\eta_{sys}\times E_{sd}} \tag{1}$$

$$P_{pv,stc}=E_{o}\times\eta_{pv,stc}\times A_{pv} \tag{2}$$

式中，A_{pv}——太阳电池表面积，m^2；E_{Ld}——居民日均用电量，kWh/d；η_{sys}——太阳能发电系统总效率；E_{sd}——太阳能日均辐射量，$kWh/(m^2\cdot d)$；$\eta_{pv,stc}$——标准测试条件下太阳电池的输出电能，kW；E_{o}——标准测试条件下的日照强度，1 kW/m^2；$\eta_{pv,stc}$——太阳电池额定效率，通常为0.1~0.15。

2.2燃料电池和电解槽的容量设计

在确定了光伏发电系统的容量后，可根据居民用电负载的最大和最小功率来确定燃料电池和电解槽的额定功率，计算方法如式(3)、式(4)所示：

$$P_{\mathrm{el,rated}} = P_{\mathrm{pv,stc}} - P_{\mathrm{ldi}} \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{fc,rated}} = P_{\mathrm{ldm}} \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{fc,rated}}$——燃料电池的额定功率，kW；$P_{\mathrm{el,rated}}$——电解槽的额定功率，kW；P_{ldm}——负载最大功率，kW；P_{ldi}——负载最小功率，kW。

3系统建模

3.1光伏阵列模型

太阳电池的等效电路如图2所示。

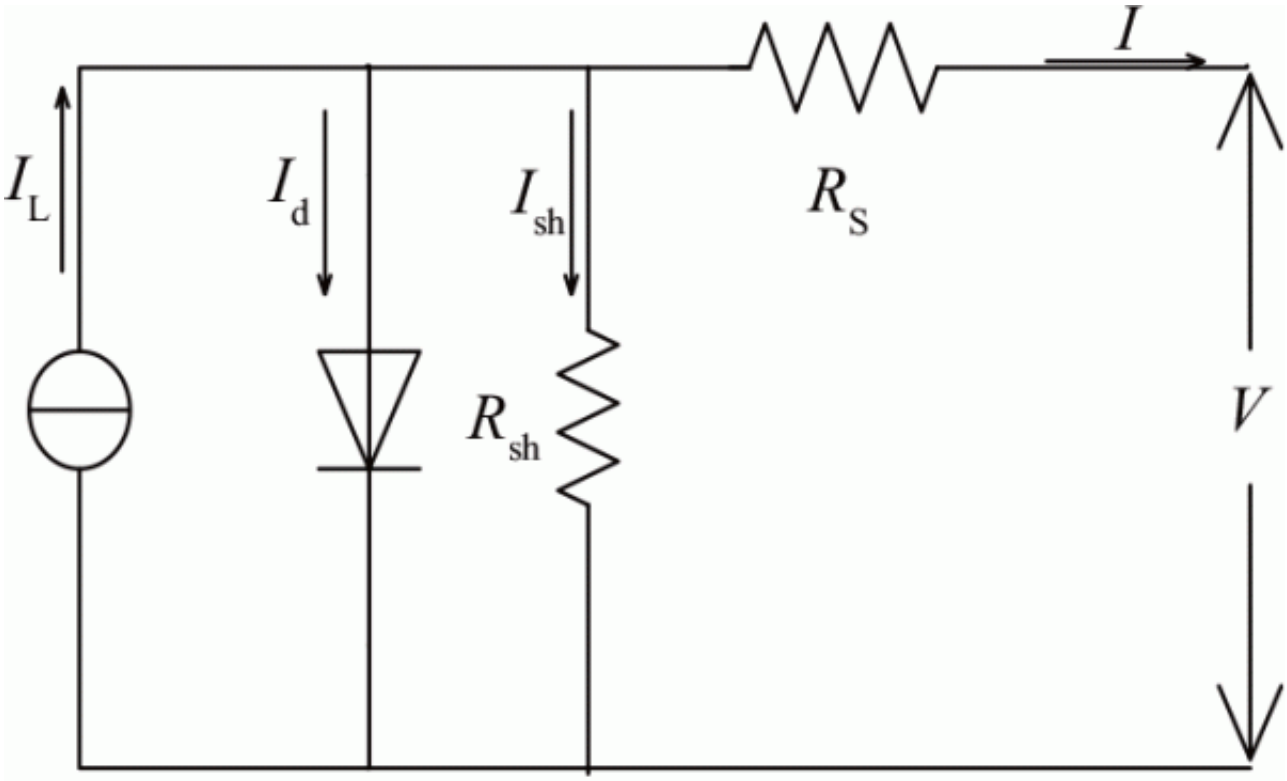


图2　太阳电池等效电路

Fig. 2　Equivalent circuit of solar cell

太阳电池在低负载条件下，可看作为一个恒流源，在高负载时，电压降为零，因此它是一个理想的电流源[5~7]。

单个电池发电状态的电流方程式为：

$$I_{pv}=I_{ph}-I_{o}\left\{\exp\left[\frac{q(V_{pv}+I_{pv}R_{s})}{AKT}\right]-1\right\}-\frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad (5)$$

其中，

$$I_{o}=I_{or}\left(\frac{T}{T_{r}}\right)^{3}\exp\left[\frac{qE_{G}}{KA}\left(\frac{1}{T_{r}}-\frac{1}{T}\right)\right] \quad (6)$$

$$I_{ph}=\left[I_{scr}+k_{i}(T-T_{r})\right]\lambda/100 \quad (7)$$

式中，I_L——光生电流，A；I_d——流过二极管电流，A；V——输出电压，V；I——输出电流，A；R_{sh}——等效并联负载，Ω；R_s——等效串联负载，Ω；I_o——反向饱和电流，A；I_{or}——饱和电流，A；q——电子电荷；A——二极管因子；T_r——参考温度，K；T——绝对温度，K；K——玻尔兹曼常数；E_G——能带隙能量；I_{ph}——光电流，A；I_{scr}——短路电流，A；k_i——短路电流温度系数，0.0017 A/℃；λ——太阳日照强度，mW/cm^2。

太阳电池在低负载条件下，可看作为一个恒流源，在高负载时，电压降为零，因此它是一个理想的电流源[5~7]。

3.2燃料电池模型

质子交换膜燃料电池（PEMFC
）的基本原理是氢气和氧气反应产生水并释放电能[8~13]。单个质子交换膜燃料电池工作原理如图3所示。

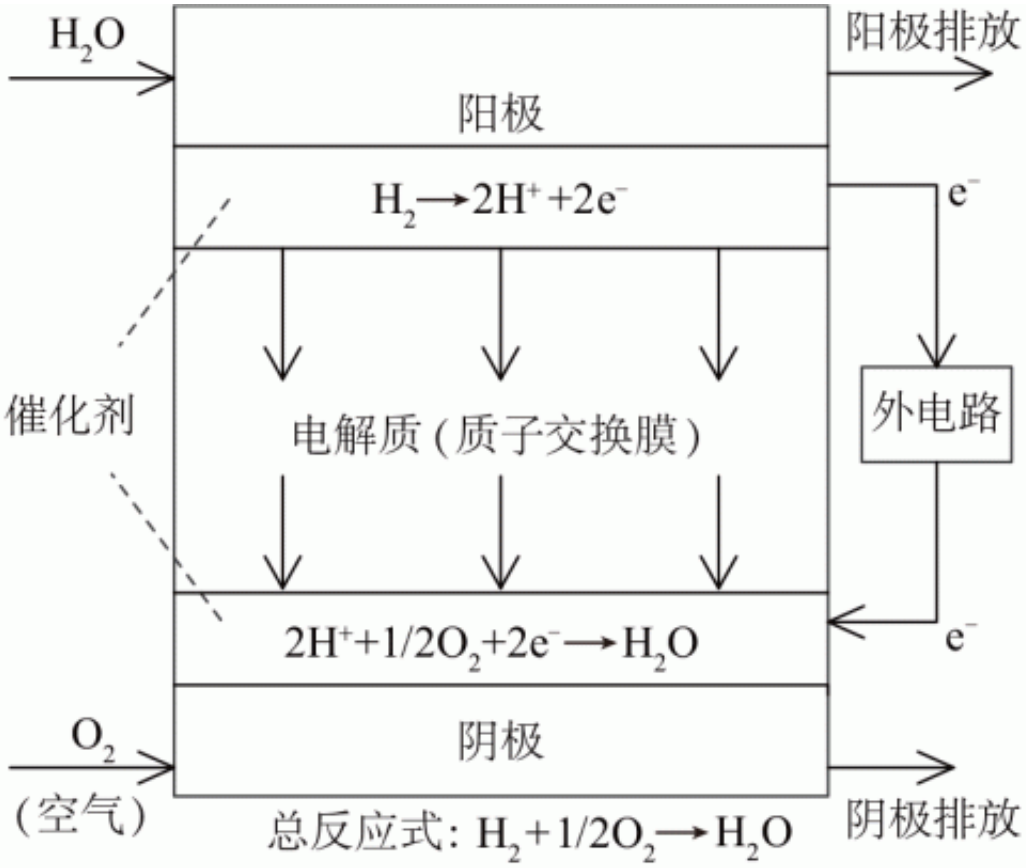


图3　燃料电池工作原理图

Fig. 3　Principle of fuel cell

通常在 100 ℃以下工作的 PEMFC 的开路电压约为 1.2 V，然而由于活化过电压 V_{act}、欧姆过电压 V_{ohmic} 和浓差极化电压 V_{con} 的存在会产生压降。

因此燃料电池单电池电压 V_{cell} 为：

$$V_{cell} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \tag{8}$$

吉布斯自由能随压力和温度的变化而变化，可从经验方程中得到吉布斯自由能的近似方程：

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{p_{H_2}p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}\right) \tag{9}$$

式中的压力都是气体分压，通常情况下，阴极和阳极的气体压力大致相同。

根据标准状态下的熵变值，式(9)可写成：

$$E_{nernst} = 1.229 - 8.5\times10^{-4}(T-298.15) + 4.308\times 10^{-5}T\left[\ln(10^{-2}\times p_{H_2}) + 0.5\times\ln(10^{-2}\times p_{O_2})\right] \tag{10}$$

式中，T——电池温度，K；p_{H_2}——H_2的有效分压；p_{O_2}——O_2的有效分压。

活化过电压的经验方程如下：

$$V_{act} = -\left\{\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T[\ln(c_{O_2})] + \xi_4 T[\ln(I_{st})]\right\} \tag{11}$$

式中，ξ_1、ξ_2、ξ_3、ξ_4——燃料电池系统经验参数。

c_{O_2}表示在气液界面O_2的溶解浓度，由 Henry 定理可得：

$$c_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{5.08\times10^6\exp\left(-\frac{498}{T}\right)} \tag{12}$$

欧姆过电压是电流通过整个电路的电阻所带来的损失，主要源于阻碍质子流通过质子膜的质子膜等效阻抗 R^{proton}，以及电子通过外电路的电子流动阻抗 $R^{electronic}$，其中前者占主要作用。根据欧姆定律可得：

$$V_{ohmic} = V_{ohmic}^{electronic} + V_{ohmic}^{proton} = I_{st}(R^{electronic} + R^{proton}) \tag{13}$$

式中，$R^{electronic}$——电子流动阻抗，在电池温度为 50~90 ℃之间时可视为常数。

膜阻抗为：

$$R^{proton} = \frac{\rho_M \times l}{A} \tag{14}$$

式中，ρ_M——膜电阻率，Ω·cm，l——电解质膜的厚度，cm。

膜电阻率为：

$$\rho_M = \frac{181.6\left[1 + 0.03\left(\frac{I}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\left(\frac{I}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\phi - 0.634 - 3\left(\frac{I}{A}\right)\right]\times\exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]}$$

浓差过电压可表示为：

$$V_{con} = -B \times \ln\left(1 - \frac{I_{den}}{I_{max}}\right) \quad (16)$$

式中，B ——方程系数，由燃料电池本身和其工作状态决定；I_{den} ——电池运行的实际电流密度，A/cm^2；I_{max} ——电池运行所能达到的最大电流密度，A/cm^2。

4系统仿真及结果分析

为了检验本文提出的混合发电系统的可行性，在Matlab软件中对混合系统建立了Simulink仿真模型[7]，其中包括光伏发电系统模型、燃料电池/超级电容模型、电解池模型、直流升压变流器模型[14, 15]及逆变器模型[16, 17]等，如图4所示。

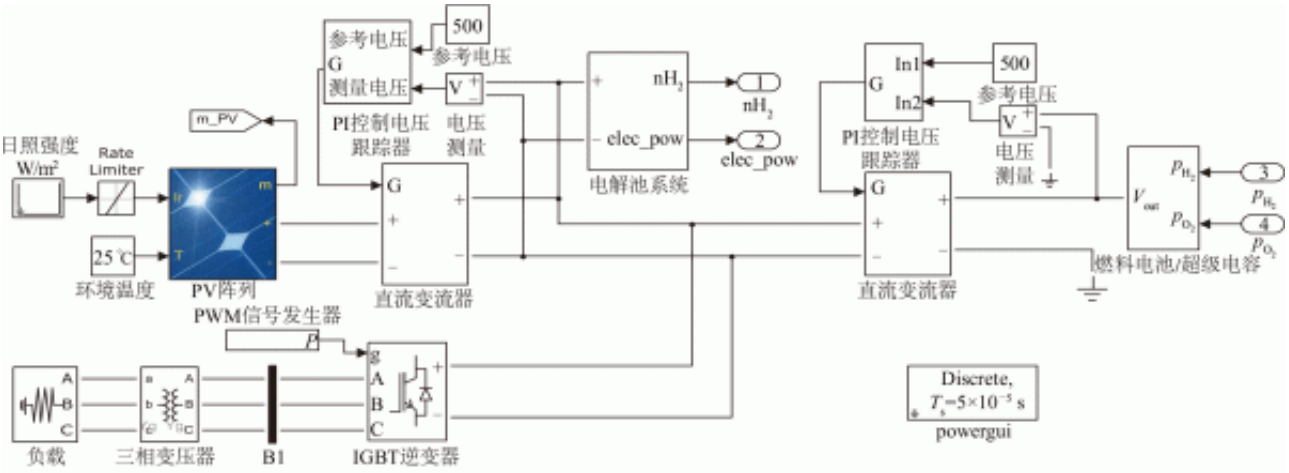


图4　光伏-燃料电池混合发电系统仿真模型

Fig. 4　Modeling of PV-fuel cell hybrid power system

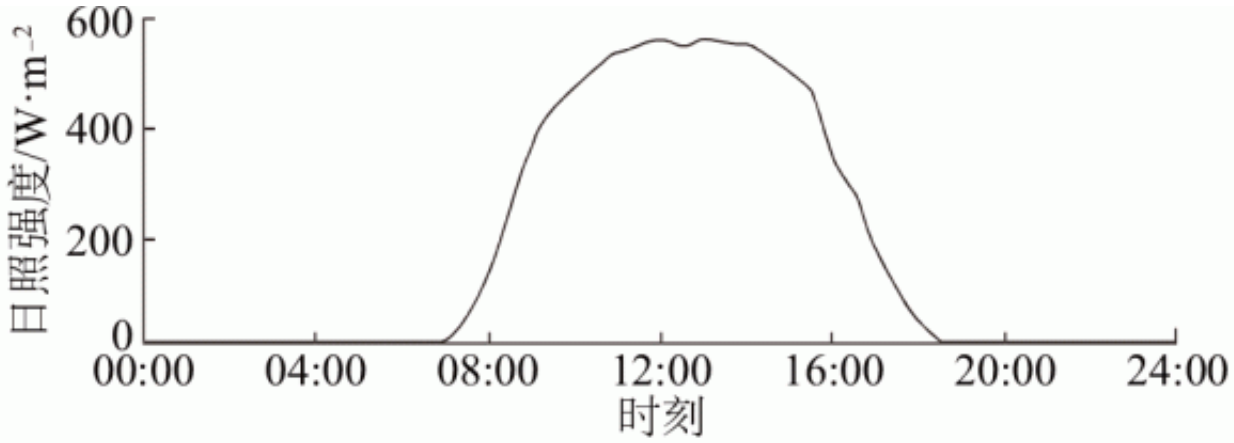
4.1混合发电系统容量的确定

以武汉市为例，根据实验室测量数据得知，每年10月份其日平均辐射能为4.9kWh/（m^2·d），居民日平均耗电量为7.8kWh/d，取光伏发电系统总效率η sys为4.2%，太阳电池额定效率η pv，stc为13.8%[18]，则根据式（1）和式（2）计算可得太阳电池表面积为37.9m2，太阳电池的峰值功率约为5.23kW。假设负载的峰值功

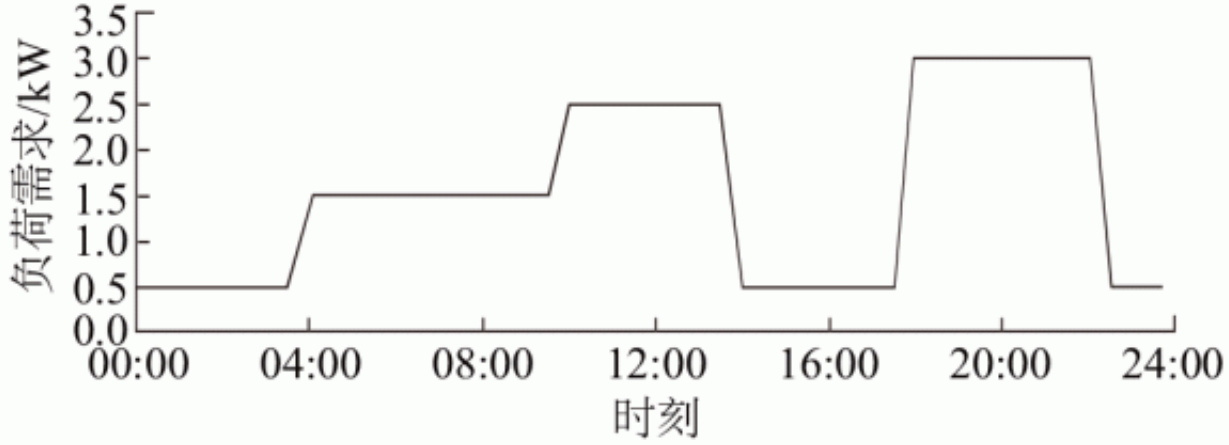
率和低谷功率分别3.0和0.5kW，则根据式（3）和式（4）计算可得燃料电池额定功率为3kW，电解槽额定功率为4.73kW。

4.2系统仿真结果分析

武汉大学太阳能实验室于2015年10月份某天所采集的日照强度如图5a所示，环境温度设定为25℃，用户用电负荷波形如图5b所示。在变化的光照强度下，太阳电池的伏安特性随之变化，因此光伏系统的输出功率大小也发生变化。由于负载功率也是变化的，所以当光伏系统的输出功率可以满足家居用电要求时，光伏系统单独向负载供电，其余电能供给电解池电解水制氢存储起来，以备燃料电池使用；当光伏系统输出功率不能满足家居用电要求时，燃料电池按负载功率与光伏系统输出功率的差值工作。



a. 日照强度随时间变化



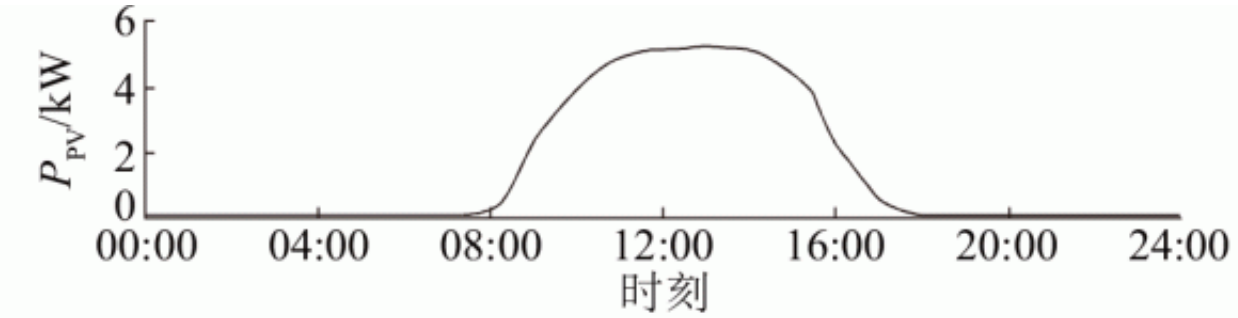
b. 负载功率随时间变化

图5　日照强度和负载功率随时间变化曲线

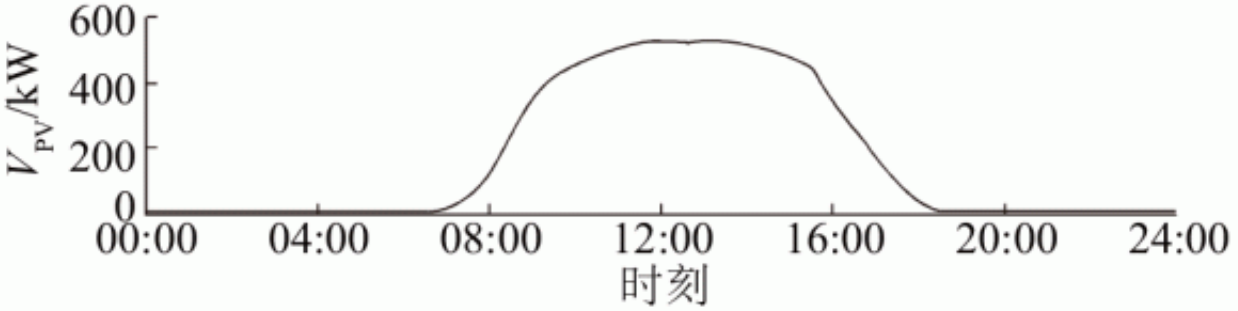
Fig. 5　Curves of irradiance and load power

在上文所述条件下对系统进行仿真，仿真结果如图6~图8所示。

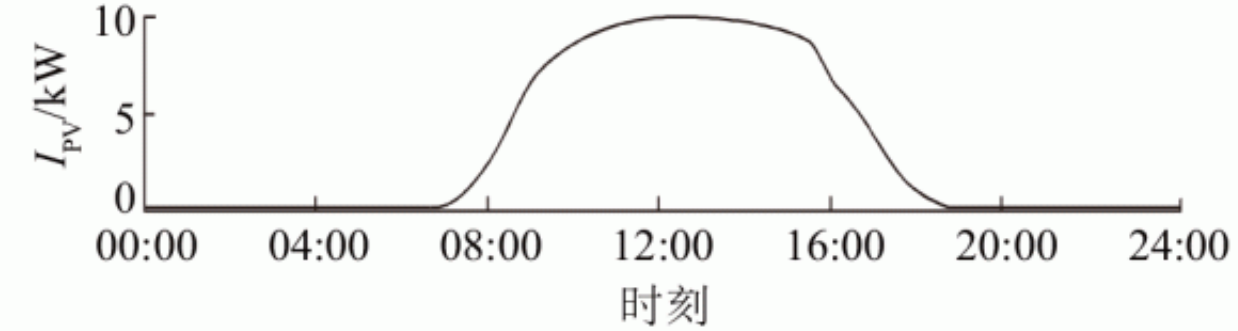
图6是太阳电池阵列输出功率、电压、电流随时间变化的曲线图。图6a与图5a对比可看出，光伏系统的输出功率与日照强度相一致。



a. 太阳电池阵列输出功率随时间变化



b. 太阳电池阵列输出电压随时间变化

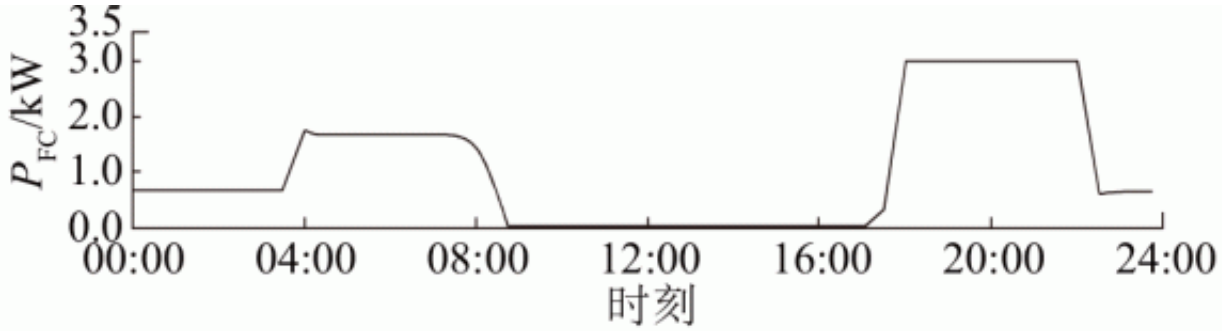


b. 太阳电池阵列输出电流随时间变化

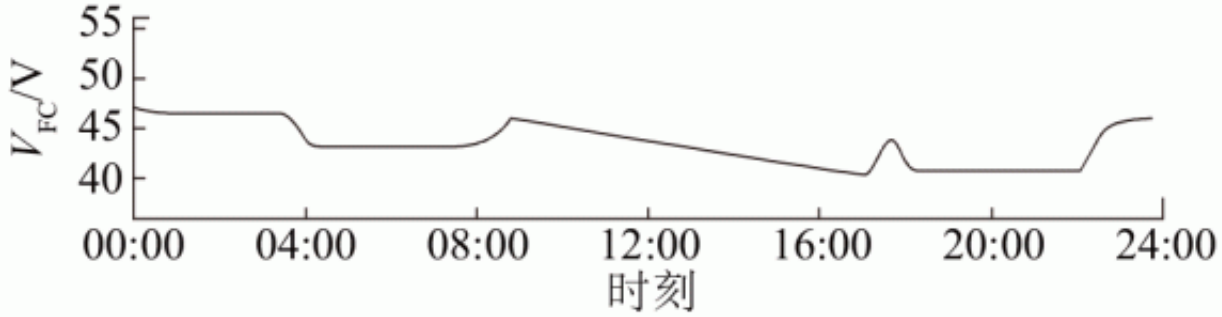
图6　太阳电池阵列输出功率、电压、电流随时间变化曲线

Fig. 6　Output power, voltage and current of PV cell array

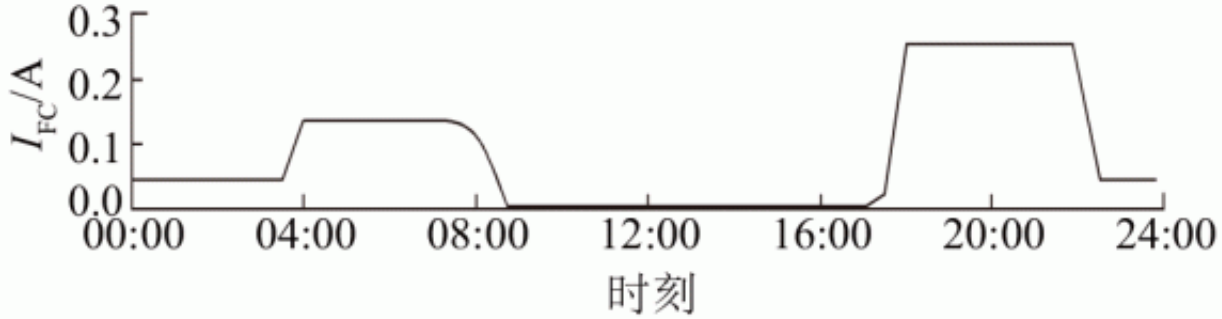
图7是燃料电池输出功率、电压和电流随时间变化曲线图。由图7a可看出，在08:30~17:00时燃料电池的输出功率几乎为零。这是因为在这一时间段光伏发电系统输出的电能基本上可以满足用户用电需求。从图7a与图5a、图6a对比可看出，00:00~6:00及18:30~24:00时，日照强度为零，光伏发电系统的功率输出为零，此时用户用电完全由燃料电池提供。



a. 燃料电池阵列输出功率随时间变化



b. 燃料电池阵列输出电压随时间变化



b. 燃料电池阵列输出电流随时间变化

图7　燃料电池输出功率、电压、电流随时间变化曲线

Fig. 7　Output power, voltage and current of fuel cell

光伏-燃料电池混合发电系统的输出总功率对用户负荷变化的响应曲线如图8所示。由图可见混合发电系统的电能供给与用户用电负荷需求基本一致。在太阳电池输出功率不能满足负载需求时，燃料电池可较好地进行补充，辅助太阳电池供电，使本系统总体上可满足居民日常用电需求，实现对负荷的有效追踪。

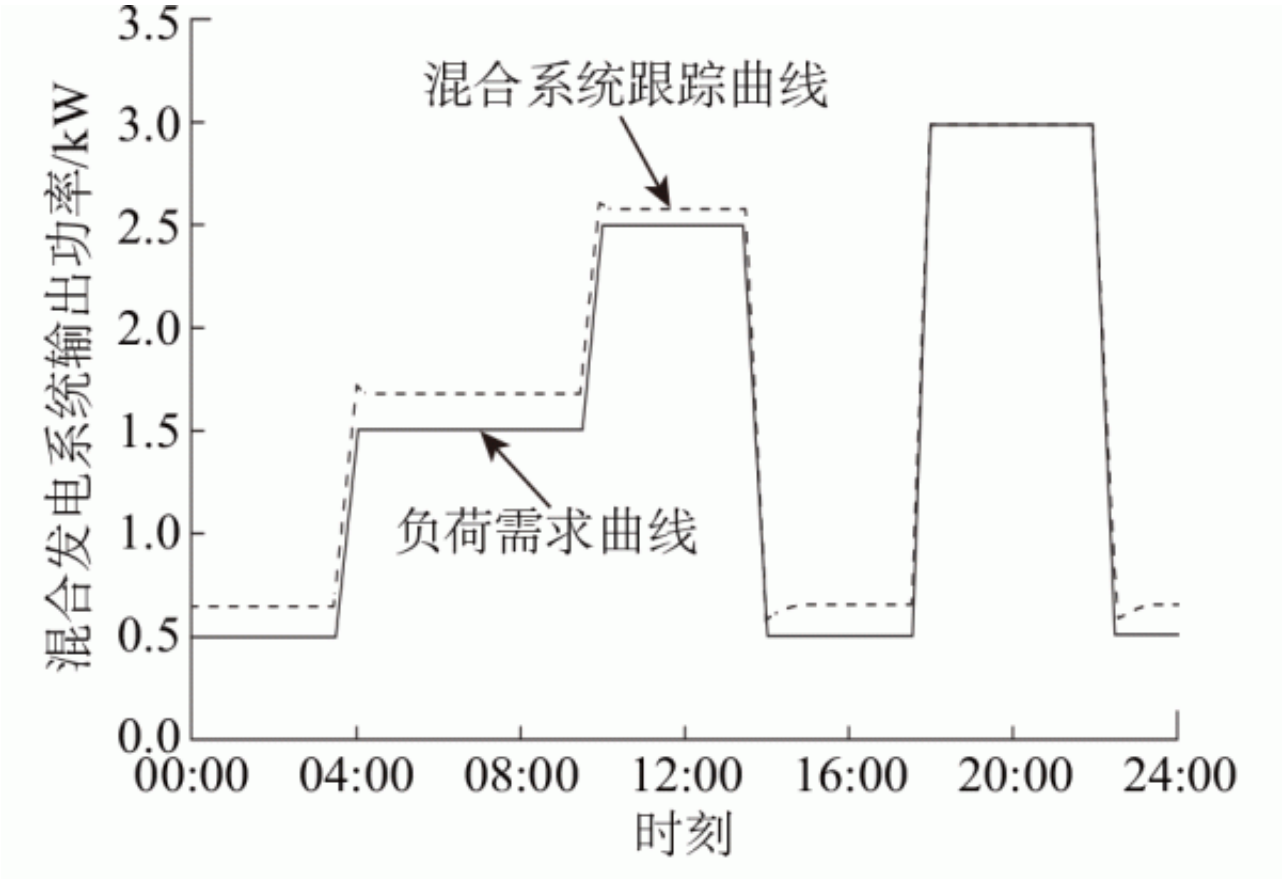


图8　混合发电系统输出功率对负荷变化的响应曲线

Fig. 8　Response curve of output power of hybrid power generation system to load variation

5系统经济可行性分析

现阶段我国光伏发电技术已较为成熟，并且在家居民用中使用也较为广泛；而据参考文献[19]可知，1kW燃料电池的投资费用约为45258.4￥，1kW普通蓄电池的费用约为15200￥，由此可见，燃料电池的投资成本仍较高。

由以上分析可知，现阶段将光伏-燃料电池混合发电系统应用于家居仍有较高的成本，但随着光伏发电和电解水制氢效率的提高以及质子交换膜燃料电池的成本降低，光伏-燃料电池混合发电系统的经济与社会效益将日益显著。并且由于该系统具有储能密度高、使用寿命长以及无污染等特点，目前可适用于一些特殊应用领域，如制成军用特种电源或用在部队通信系统中；燃料电池在发电的同时还产生纯净水，因此，该系统也适用于缺乏淡水的海岛。

6结论

本文建立用于家居的光伏-燃料电池混合发电系统的动态模型，包括光伏发电系统模型、燃料电池/超级电容模型、电解池模型、直流升压变流器模型以及逆变器模型等，并在Matlab/Simulink软件中依据家居实际用电情况对混合发电系统的模型进行了仿真分析。仿真结果表明：在混合发电系统中使用燃料电池可较好地克服光伏发电的随机性对发电系统的不利影响。混合系统在日照强度和居民用电负荷发生变化时保证了良好的供电量，具有供电可靠性和稳定性。最后以武汉地区光伏日照强度和居民用电量为例，验证该混合发电系统可满足家居用电负荷要求。

[参考文献]

[1] 张文亮，刘壮志，王明俊，等.智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术，2009，33(13)：1—11.

[1] Zhang Wenliang, Liu Zhuangzhi, Wang Mingjun, et al. Research status and development trend of smart grid [J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 1—11.

[2] 李 炜，朱新坚，曹广益. 一种新型的太阳能燃料电池联合发电系统[J]. 自动化仪表，2006，27(2)：1—5.

[2] Li Wei, Zhu Xinjian, Cao Guangyi. A new combined power generation system of solar energy and fuel battery [J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27 (2): 1—5.

[3] 李春华，朱新坚，胡万起，等. 光伏/燃料电池联合发电系统的建模和性能分析[J].电网技术，2009，33 (12)：88—93，111.

[3] Li Chunhua, Zhu Xinjian, Hu Wanqi, et al. Modeling and performance analysis of photovoltaic/fuel cell hybrid power generation systems [J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 88—93, 111.

[4] 沙德尚，孔 力，孙 晓. 燃料电池功率调节系统的研究[J]. 太阳能学报，2004，25(2)：227—231.

[4] Sha Deshang, Kong Li, Sun Xiao. Study on power conditioning system for fuel cell [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(2): 227—231.

[5] 徐红伟，张立彬，胥 芳，等. 基于功率预测和电压补偿的太阳电池 MPPT 方法研究[J]. 太阳能学报，2013，34(9)：1599—1605.

[5] Xu Hongwei, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Study on MPPT method based on power forecasts and voltage compensation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(9): 1599—1605.

[6] 史君海，朱新坚，隋　生，等. 燃料电池-光伏混合发电系统建模与仿真[J]. 电源技术，2007，31(9)：728—731.

[6] Shi Junhai，Zhu Xinjian，Sui Sheng，et al. Model and simulation of PV-fuel cell hybrid power system[J]. Chinese Journal of Power Sources，2007，31(9)：728—731.

[7] Yusop A M，Mohamed R，Ayob A，et al. Dynamic modeling and simulation of a thermoelectric-solar hybrid energy system using an inverse dynamic analysis input shaper[J]. Modeling and Simulation in Engineering，2014，2014(1)：1—13.

[8] 徐　敏，阮新波. 质子交换膜燃料电池经验模型[J]. 太阳能学报，2010，31(7)：816—823.

[8] Xu Min，Ruan Xinbo. Empirical model of proton exchange membrange fuel cell[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2010，31(7)：816—823.

[9] 卢继平，白树华. 风光氢联合式独立发电系统的建模及仿真[J]. 电网技术，2007，31(22)：75—79，84.

[9] Lu Jiping，Bai Shuhua. Modeling and simulation of conjoint independent power generation system consisting of power generation by wind energy，solar energy and hydrogen energy[J]. Power System Technology，2007，31(22)：75—79，84.

[10] Nguyen G，Sahlin S，Andreasen S J，et al. Dynamic modeling and experimental investigation of a high temperature PEM fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2016，41(8)：4729—4739.

[11] Nelms R M，Cahela D R，Tatarchuk B J，et al. Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2003，39(2)：430—438.

[12] Spyker R L，Nelms R M. Analysis of double-layer capacitors supplying constant power loads[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2000，36(4)：1439—1443.

[13] 闫晓金，潘　艳，宁　武，等. 超级电容-蓄电池复合电源结构选型与设计[J]. 电力电子技术，2010，44(5)：75—77.

[13] Yan Xiaojin，Pan Yan，Ning Wu，et al. Design and analysis of the structure of ultracapacitor/battery hybrid system[J]. Power Electronics，2010，44(5)：75—77.

[14] 王兆安，黄　俊. 电力电子技术[M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[14] Wang Zhaoan，Huang Jun. Power electronics technology

[M]. Beijing: Machinery Industry Publishing House, 2001.

[15] Yang Yinan. Anduo 100 kWp transient operation of photovoltaic system stability analysis[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2003.

[16] 周 林,冯 玉,郭 珂,等.单相光伏并网逆变器建模与控制技术研究[J].太阳能学报,2012,33(3):485—493.

[16] Zhou Lin, Feng Yu, Guo Ke, et al. Research on modeling and control strategy for single-phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(3): 485—493.

[17] 古俊银,陈国呈.单级式光伏并网逆变器的快速MPPT方法[J].太阳能学报,2014,35(1):154—160.

[17] Gu Junyin, Chen Guocheng. A fast MPPT algorithm for single-state grid-connected PV inverter[J]. Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(1): 154—160.

[18] 李 炜,独立的太阳能燃料电池联合发电系统的协调控制设计与仿真研究[D].上海:上海交通大学,2007.

[18] Li Wei. Coordination of the independent solar fuel cell joint power generation system control design and simulation research[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.

[19] 王侃宏,侯佳松,肖静静,等.太阳能光伏-燃料电池联合发电系统蓄电池和燃料电池的配置研究[J].西华大学学报:自然科学版,2011,30(6):43—47.

[19] Wang Kanhong, Hou Jiasong, Xiao Jingjing, et al.The configuration research of the battery and fuel cell in hybrid powergeneration system of photovoltaic and fuel cell[J]. Journal of Xihua University, 2011, 30(6): 43—47.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/161164.html