

含燃料电池并网系统的微电网稳定性建模分析

对于含有可再生能源发电的微电网，储氢是调节可再生能源波动性的重要手段。燃料电池是常用的将存储的氢能转化为电能回馈给电网的直流型分布式发电设备。建立了典型固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）的并网系统模型，其中主要包括燃料电池堆动态模型、原动机控制模型以及电力电子设备构成的能量转换装置模型。主要分析了SOFC的负荷跟随特性、电力电子装置的快速功率调节特性，研究了燃料电池并网系统对提高配电系统电压稳定性的作用，最后通过算例验证了该方法的有效性。

胡亚平/中国南方电网电力调度控制中心 刘振国/广东电网有限责任公司
电力科学研究院 李 慧/中国电器科学研究院有限公司

0 引言

近年来，由于环境问题和能源问题日益突出，如何保护环境和提高能源的利用率逐渐成为世界各国关注的热点问题。微电网可以整合用电区域多种可再生能源，并和大电网双向输电，极大地提升了可再生能源利用率和供电可靠性，也能够减少二氧化碳等温室气体的排放量^[1-3]。

由于受到天气、季节等因素的影响，微电网中可再生能源的输出功率具有随机性和波动性。为了调节微电网中可再生能源的波动性，可将波动的可再生能源通过电解水转化成氢能进行存储，需要时再将氢能转化为平稳的电能输送到电网中。氢能是一种清洁能源，能够实现能源的长时间存储，为平抑可再生能源波动提供了一种新的方式。燃料电池是常用的能够高效地将存储的氢能转化为电能回馈给电网的直流型分布式发电设备，在其发电过程中排出的主

要是水，不会对环境造成污染^[4-5]。

燃料电池是一种把贮存在燃料和氧化剂中的化学能等温地转化为电能能量转换装置。最常用的燃料为纯氢、各种富含氢的气体（如重整气）和某些液体（如甲醇水溶液）。常用的氧化剂为纯氧、净化空气等气体和某些液体（如过氧化氢和硝酸的水溶液等）。氧化剂均为流体（气体和液体），平时贮存在外部的贮罐中，在燃料电池输出电流做功时，需要通过泵或者鼓风机来使空气和燃料得以循环，同时排出反应产物^[6-7]。从工作方式上看，其类似于常规的汽油或柴油发电机，而与燃料和氧化剂均贮存在电池内部的常规电池有较大差别。大部分燃料电池都可以用于小型用户发电和商业发电，发电容量为10~100 kW，中低温燃料电池大部分都以回收系统将废热变成可以利用的蒸汽，而高温燃料电池还可以用于热电联供，向用户提供热能。发电容量大于100 kW的高温燃料电池，如固态氧化物燃料电池（SOFC）和熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）可以用于燃料电池电站的建设，这种电站类似于传统的集中型发电厂，高温废气还可以与其他的发电装置如涡轮发电机组成混合发电系统^[8-9]。本文重点讨论SOFC并网系统的建模问题和暂态特性研究。

目前，国内外学者对SOFC的研究主要集中在元件本身建模以及并网之后的控制方式分析。文献[10]利用内外双闭环控制方法建立了仿真系统的模型，使得燃料电池并网逆变器输出达到系统要求



胡亚平/工程师

关键词/Keywords

储氢 ·
燃料电池 ·
并网系统 ·
电压稳定性 ·

并能动态跟踪系统的功率输出情况。文献[11]利用脉宽调制技术控制变频器的占空比,实现了对燃料电池输出电压的控制,经过滤波后通过变压器并入电网,有效地减少了燃料电池并网带来的谐波污染,提升了电能质量。文献[12]研究了并网控制系统的拓扑结构和控制策略,提出了DC/DC变换器和DC/AC逆变器的设计思路,重点分析了有功功率和无功率解耦滞环控制策略的设计方法。

本文总结了以往文献对于SOFC研究的成果,系统阐述了在稳定性分析方面SOFC并网系统的建模方法和需要解决的主要问题,最后通过实际配电系统案例分析证明了SOFC在提高暂态稳定性方面的特性。

1 典型SOFC动态模型

1.1 SOFC电池堆的基本原理

固态氧化物燃料电池SOFC是用于大型燃料电池电站建设的一种燃料电池^[13]。其内部电池堆(SOFC Stack)主要的物理变化由以下三个部分所决定。

(1) 电化学模型

这一部分主要由SOFC内部各种化学元素的平衡方程决定,其中各种化学元素具有自身的动态特性,由化学动力学微分方程确定。先从电池的正负两极吹入氢气和氧气,相互反应变成水,同时产生大量电子吸附在电池两极上形成电池电势,经过电池内部电阻损耗电压降,外接负载产生直流电压 V_{DC} 和直流电流 I_{FC} 。图1为整个SOFC电池堆的电化学原理。

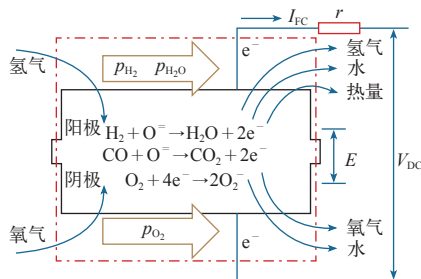
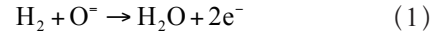
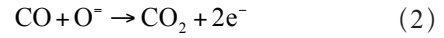


图1 SOFC电池堆电化学原理示意图

主要的两极化学反应方程如下。

阳极为



阴极为



以上描述的各种化学反应物之间的化学反应可以用反应物形成的流速率的动态特性方程联系在一起,即

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt} p_i = N_i^{\text{in}} - N_i^{\text{out}} - N_i^r \quad (4)$$

式中, p_i 为每种反应物的压力,atm; N_i^{in} 、 N_i^{out} 为每种反应物进量和出量的流速率,mol/s; N_i^r 为每种反应物的反应速率,mol/s; T 、 V 分别为电池堆内部温度(K)和体积(m^3); R 为气体常数($8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$); i 为 H_2 、 O_2 和 H_2O 。

由于电池堆的进出口限制作用,反应物速率 N_i^{out} 和压力 p_i 之间存在比例关系(以 H_2 为例),即

$$\frac{N_{H_2}^{\text{out}}}{p_{H_2}} = K_{H_2} \quad (5)$$

式中, K_{H_2} 为阀门摩尔常数。

氢气的压力 p_{H_2} 和输出电流 I_{FC} 、反应量 $N_{H_2}^r$ 之间存在函数关系,即

$$N_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{FC}^r}{2F} = 2K_r I_{FC}^r \quad (6)$$

式中, N_0 为燃料电池的串联个数; F 为法拉利常数,C/kmol; K_r 为反应过程中模拟常数; I_{FC}^r 为用于燃料平衡控制系统的经过量测环节处理后的电流值。

忽略电池堆内部压力,结合式(4)~式(6),由Laplace变换得到

$$p_{H_2}(s) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + s\tau_{H_2}} (N_{H_2}^{\text{in}} - 2K_r I_{FC}^r) \quad (7)$$

式中, $\tau_{H_2} = V/(RTK_{H_2})$,同理 O_2 、 H_2O 具有的类似式(7)的形式,即

$$\tau_{O_2} \frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{1}{K_{O_2}} (N_{O_2}^{\text{in}} - K_r I_{FC}^r) - p_{O_2} \quad (8)$$

$$\tau_{H_2O} \frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{1}{K_{H_2O}} (2K_r I_{FC}^r) - p_{H_2O} \quad (9)$$

式中, $\tau_{O_2} = V/(RTK_{O_2})$, $\tau_{H_2O} = V/(RTK_{H_2O})$ 。

(2) 热力学模型

这一部分由SOFC内部能量的平衡方程决定。主要描述了电池内部的温度动态变化情况，这一部分在实际仿真过程中可以忽略，即认为电池堆内部的温度是恒定的。

(3) 电路模型

燃料电池电路模型主要由欧姆定律和Nernst电压方程决定。本文考虑由电池内部电阻造成的电压损耗，并且忽略燃料电池的活化损耗（Activation Losses）以及聚集损耗（Concentration Losses）对电压的影响，则燃料电池两端电压和电流的关系可以用Nernst电压方程表示，即

$$\begin{cases} V_{FC} = E_{Nernst} - R_{ohm}^{stack} I_{FC} \\ E_{Nernst} = N_0 E_0 + E_f \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \end{cases} \quad (10)$$

式中， E_{Nernst} 为可逆开路电压； E_0 为标注反向燃料电池电动势； $E_f = N_0 RT / (2F)$ ； N_0 为串联单体燃料电池个数。

燃料电池输出的堆电流 I_{FC} 和电压 V_{FC} 将与PWM逆变器或者DC/DC变换器直接相连。由上述三部分组成了燃料电池堆的主要模型结构。

1.2 SOFC电池站平衡系统

燃料电池外部气体经过一个电站平衡系统（System of Balance of Plant, BOP）进行处理进入电池内部。BOP是由天然气燃料仓库（Fuel Storage）、燃料阀门（Fuel Valve）及其控制器（Controller）以及燃料处理部分（Fuel Processor）组成的^[14]。整个SOFC的典型动态模型如图2所示^[15]。

以氢气为例，定义燃料电池利用率为

$$u = \frac{N_{H_2}^r}{N_{H_2}^{in}} \quad (11)$$

这是燃料电池的重要技术参数，也是评价燃料电池使用水平的重要指标。结合式（6）在稳态条件下可以得到

$$N_f = N_{H_2}^{in} = \frac{2K_f}{u} I_{FC}^r \quad (12)$$

利用率因子一般情况下在80%~90%之间，

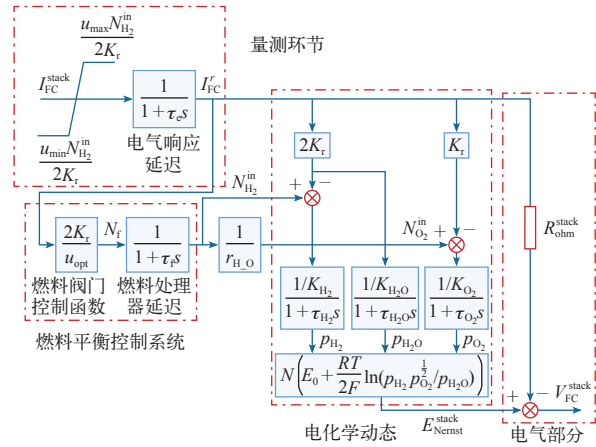


图2 SOFC典型动态模型

则对于设定的电池堆电流一般在以下范围之内

$$\frac{0.8 N_{H_2}^{in}}{2K_f} \leq I_{FC}^{stack} \leq \frac{0.9 N_{H_2}^{in}}{2K_f} \quad (13)$$

根据式（12）可以建立图2中BOP虚框内部工作原理图，在堆电流和天然气进量流之间建立如图3所示关系，即

$$I_{FC} \rightarrow \frac{2K_f}{u_{opt}} \rightarrow N_f$$

图3 BOP中天然气进量和堆电流的关系

图3中， u_{opt} 为设定燃料最佳利用率因子。天然气进量流经过燃料处理部分变成氧气进量流、氢气进量流，燃料处理部分用一个一阶惯性环节来模拟其延迟。

1.3 SOFC的主要控制系统

(1) 堆电流和网络负荷波动间的动态响应控制

SOFC内部主要控制系统是在BOP中根据负荷波动情况对天然气进量流的控制，即控制天然气进量 N_f 得到最佳稳态利用率因子^[16]。可以看出，天然气进量的变化是由堆电流产生的，如果忽略电力电子装置的内部损耗，则可以得到

$$P_{AC} = P_{DC} = V_{DC} I_{FC} \quad (14)$$

式中， V_{DC} 为直流侧电压， $V_{DC} = V_{FC}$ 。

堆电流 I_{FC} 和网络功率之间联系如图4所示。由图2~图4所确定的SOFC原动控制模型和堆动态模型是稳定性分析中并网系统建模的核心部分，在机电过程时间尺度内SOFC的进量控制相对比较缓慢，这对于直流侧功率跟随特性有一定的

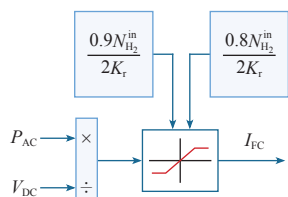


图4 堆电流和网络负荷波动之间的动态响应

负面作用，因此需要在交流侧采用电力电子装置（特别是逆变器出口电压和有功控制）来弥补这一缺陷。

(2) 并网侧动态响应控制

网络侧SOFC需要采用电力电子装置将直流电转换为工频交流电并网。电力电子装置由两部分组成，一部分是由逆变器、变频器等设备构成的能量转换装置；另一部分是控制环节，作用是对交流网络和直流通路的能量进行调节。电力电子装置和控制环节构成了SOFC的功率调节单元（Power Conditioning Unit, PCU），PCU是分布式电源并网系统和传统网络的主要区别。PCU中的控制环节主要作用是控制电源输出的有功功率和与电网交换的无功功率，以确保输出电能的质量，保证并网运行模式下分布式电源与电网的同步运行^[17-18]。

以电力电子装置为主体的SOFC能量转换装置分为单级拓扑和双级拓扑两种常用方式。单级拓扑能够代表交流网络侧的主要电压功率联系，以下主要以单极拓扑说明问题。

单级拓扑是将燃料电池直流信号直接和逆变器接口相连，主要缺点是需要逆变器的直流侧并联较大容量的电容器来维持直流电压的恒定，优点是控制相对比较简单，不需要设计升压和斩波电路。单级拓扑的结构可以用图5进行描述。

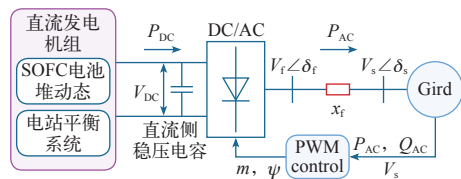


图5 并网电路单级拓扑结构图

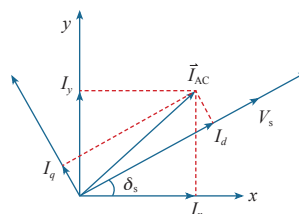
对于稳定性分析研究，逆变器的建模需要简化，简化的模型假设逆变器是一个理想的正弦电

压源模型，在 dq 坐标系下的模型表达形式为

$$I_d + jI_q = \frac{V_f \angle \phi - V_s \angle 0}{jx_f} \quad (15)$$

式中， $\phi = \delta_f - \delta_s$ ，是在假定网络侧母线电压为参考点时，母线电压相对于网络平衡母线的相角，类似于传统同步发电机内部的功角，可以作为坐标变换的旋转角度。

$dq-xy$ 分量之间的关系可以用图6表示。

图6 $dq-xy$ 坐标变换

两者之间的关系为

$$\begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_s & -\sin \delta_s \\ \sin \delta_s & \cos \delta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} \quad (16)$$

其主要功率约束关系为

$$\begin{cases} P_{AC} = V_s I_d = m V_{DC} V_s \sin \phi / x_f \\ Q_{AC} = V_s I_q = (V_s^2 - m V_{DC} V_s \cos \phi) / x_f \end{cases} \quad (17)$$

式中， m 为DC/AC逆变器交流侧与直流侧电压的比值， $m = V_f / V_{DC}$ 。由图2可知，直流电压 V_{DC} 受电池堆动态过程影响，堆电流受网络侧负荷波动的影响，但是其乘积始终和交流侧有功功率相等，结合式(14)可以得到以下关系，即

$$I_{FC} = m V_s \sin \phi / x_f \quad (18)$$

一般逆变器的控制方式为有功、电压控制或者有功、无功控制。目的都是为了快速调节交流侧的功率波动和电压降。

2 含SOFC并网系统稳定性仿真原理

与传统机电暂态仿真实理论相类似，交流发电机采用磁链方程和定子侧电压平衡方程描述。与之相类似，SOFC视为直流发电机，采用堆动态模型描述，逆变器视为定子侧，采用 dq 坐标系下的定子电压方程描述，忽略定子侧交流电网的电磁暂态过程。SOFC直流发电机模型为

$$\begin{cases} \tau_{H_2} \frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{1}{K_{H_2}} (N_{H_2}^{in} - I_{FC} 2K_r) - p_{H_2} \\ \tau_{O_2} \frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{1}{K_{O_2}} (N_{O_2}^{in} - I_{FC} K_r) - p_{O_2} \\ \tau_{H_2O} \frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{1}{K_{H_2O}} (I_{FC} 2K_r) - p_{H_2O} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} V_{DC} = E_{Nernst} - R_{ohm}^{stack} I_{FC} \\ E_{Nernst} = N_0 E_0 + E_f \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \end{cases} \quad (20)$$

直流发电机通过逆变器交流侧和网络接口，可以比拟发电机注入电流求解的方法来确定逆变器交流侧和网络的接口模型，根据式(15)确定逆变器出口电流 dq 分量的计算公式，可以给出图7a所示的 dq 坐标下的逆变器交流侧并网模型的Thevenin等效电路。仿照一般正常发电机的建模方法，可以将图7a所示的Thevenin等效电路转化为Norton等效电路，如图7b所示。

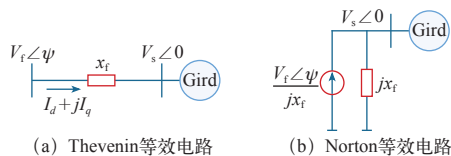


图7 逆变器交流侧并网模型设计

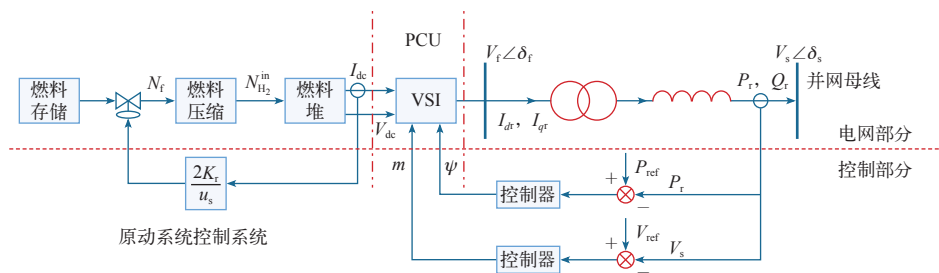


图9 燃料电池并网系统仿真模型

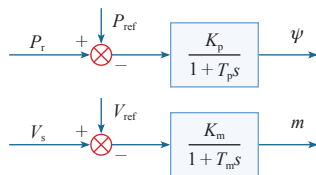


图10 PCU控制单元

出，故障发生后，堆电流迅速增大，使得燃料电池能够迅速提高其输出功率向并网母线提供支

3 平台应用和算例分析

采用典型燃料电池并网系统进行平台应用说明。测试系统采用feeder15节点配电系统，系统基值容量为10 MV·A，基值电压为6.6 kV，网络接线图如图8所示。

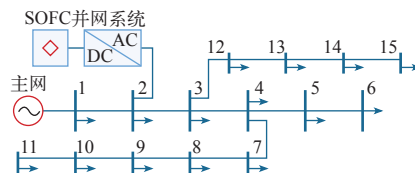


图8 Feeder15bus测试系统接线图

配电系统接入主网，馈线段采用经典发电机模型，在bus2上接入并联10个SOFC堆，接入形式为三相结构。图9为SOFC并网系统仿真模型结构。

图9中，PCU系统采用单级拓扑接网，即电压源型逆变器方式接入配电系统，PCU控制单元采用如图10的形式进行控制。图10中， P_{ref} 、 V_{ref} 为输入参考值； K_p 、 T_p 、 T_m 和 K_m 为PI控制器参数。

算例描述。5 s在bus3发生三相短路接地故障，持续0.5 s切除，仿真20 s结束，仿真步长为0.01 s。以下给出燃料电池并网系统主要参数的时域仿真曲线，如图11所示。由仿真结果可以看

撑，并网母线电压在较短时间内恢复稳定。

4 结束语

以典型SOFC的电化学模型、热力学模型和电路模型为基础，建立燃料电池的电池站平衡系统以及燃料电池并网控制系统，主要包含堆电流和网络负荷波动间的动态响应控制模型、并网侧动

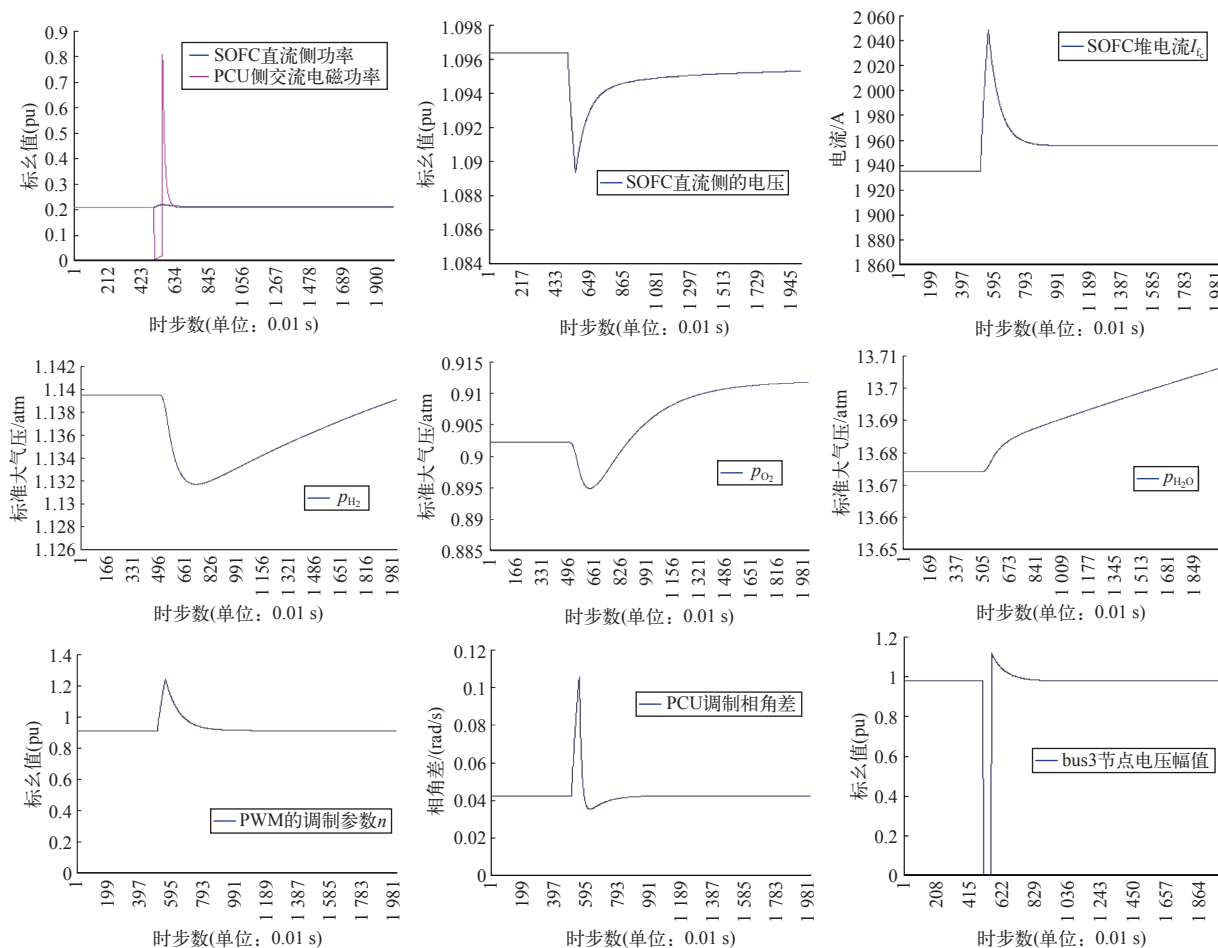


图11 SOFC变量时域仿真曲线

态响应控制模型。在此基础上分析燃料电池的负荷跟随特性以及燃料电池并网系统对提高配电系统电压的稳定性作用。最后通过算例分析验证了所提方法的有效性, 为其他形式的分布式电源并网系统提供了参考。

参考文献

- [1] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 39-46.
- [2] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66, 19.
- [3] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [4] 肖青, 陈洁, 杨秀, 等. 含多种分布式电源的微网动态经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 22-28.
- [5] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
- [6] Li Y H, Rajakaruna S, Choi S S. Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid-connected system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 405-413.
- [7] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1-13.
- [8] 王玲, 李欣然, 马亚辉, 等. 燃料电池发电系统的机电动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 40-47.
- [9] 甘天文. 新能源联合发电供电系统优化设计[J]. 能源与节能, 2016(4): 82-83.

- [10] 杨伟, 林弘, 赵虎. 燃料电池并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (21): 132-137.
- [11] 程站立, 陈维荣, 戴朝华, 等. 分布式发电中燃料电池并网的建模及其仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23 (6): 51-56.
- [12] 冷贵峰, 吴政球, 曾兴嘉, 等. 燃料电池并网发电控制系统研究[J]. 电网技术, 2009, 33 (14): 89-93.
- [13] Goel A, Mishra S, Jha A N. Power flow control of a solid oxide fuel-cell for grid connected operation [C]. International Conference on Power Electronics, 2006: 1-5.
- [14] Qiu X, Crow M L, Elmore A C. A balance-of-plant vanadium redox battery system model [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (2): 1-8.
- [15] 王成山. 微电网分析与仿真实理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [16] Milewski J, Miller A, Dmowski A, et al. The control strategy for a solid oxide fuel cell hybrid system [J]. Archives of Thermodynamics, 2009, 30 (4): 1635-1640.
- [17] Li Y, Choi S, Rajakaruna S. An analysis of the control and operation of a solid oxide fuel-cell power plant in an isolated system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 381-387.
- [18] Casas Ledón Y, Arteagaperez L E, Toledo J, et al. Exergoeconomic evaluation of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell power plant [J]. Energy, 2015, 93: 1287-1295.

(收稿日期: 2016-05-18) **EA**

信息动态

鸿雁电器跟进物流业, 搭乘电商高速快车

杭州鸿雁电器有限公司 (以下简称“鸿雁电器”) 与普洛斯集团福州项目展开深度合作, 为普洛斯物流园的建

设提供了鸿雁电器的低压配电柜、配电箱等配套设施。据了解, 除福州普洛斯物流园区外, 鸿雁电器已为普洛斯萧山、下沙、北仑、湖州、嘉善、上虞、瑞安、芜湖和常州等多个物流园区提供了全面的配电箱柜等低压配电系统解决方案。

此次合作案例, 作为传统行业跟进物流业的重要举措, 为行业的未来走向提出了相关思考——电商及物流业的快速发展, 传统行业应该如何调整才能实现合作共赢。以传统电气行业为例, 许多公司在稳固当前模式的前提下, 为拓宽现有业务渠道, 已开始积极探寻发展新思路, 而在这其中鸿雁电器表现得尤为亮眼。作为一家大型央企, 鸿雁电器始终坚持“创新为源泉”的发展思路, 率先搭乘电商物流的快车, 积极与“菜鸟物流”等物流商展开对话, 切实为电商物流的发展提供了鸿雁电器的现实解决方案, 积极主动参与电商物流的同步发展。

