

# Research Progress of Heat Management of Fuel Cell for Energy Storage

Lizhen Gan\*, Mingzhou Liu

Department of Industrial Engineering, School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui  
Email: \*ganlizhen@hfut.edu.cn

Received: Oct. 20<sup>th</sup>, 2016; accepted: Nov. 7<sup>th</sup>, 2016; published: Nov. 11<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Energy storage system is effective for current clean and renewable electricity utilization/storage. Reversible fuel cell system, as an efficient future energy conversion system, has been attracting a lot of attentions in the world. However, the reversible storage of clean electric energy based on fuel cell system also needs to meet the commercial requirements of 80% of the energy efficiency. This paper reviews the latest research progress in energy management of the fuel cell system, and the research direction of the energy management of high temperature fuel cell system is presented.

## Keywords

Clean Energy, Fuel Cells, Energy Management

---

# 基于燃料电池的储能电池系统的热能管理研究进展

甘丽珍\*, 刘明周

合肥工业大学机械工程学院工业工程系, 安徽 合肥  
Email: \*ganlizhen@hfut.edu.cn

收稿日期: 2016年10月20日; 录用日期: 2016年11月7日; 发布日期: 2016年11月11日

\*通讯作者。

## 摘要

能源存储系统是有效利用当前清洁能源/电能的主要途径之一。可逆燃料电池系统, 作为高效的能量转换系统, 已经在国际上引起广泛关注。然而, 基于燃料电池系统进行清洁电能可逆存储, 还需要满足商业化要求的80%的能量循环效率。本论文综述了当前燃料电池系统能量管理的最新研究进展, 并对高温燃料电池系统的能量管理提出了研究方向。

## 关键词

清洁能源, 燃料电池, 能量管理

## 1. 引言

近几十年来, 电能存储技术的研究和发展一直受到各国能源、交通、电力、电讯等部门的重视。电能的存储是伴随着电力工业发展一直存在的问题, 其实到现在为止也没有一种非常完美的电能储能技术, 但经过几代科学家的努力, 一些比较成熟的储能技术在各行各业发挥着重要的作用。储能的优点有很多, 节能、环保、经济。比如火电厂要求以额定负荷运行, 以维持较高的能源转换效率和品质, 但用电量却随时间随机变化, 如果有大容量、高效率的电能存储技术对电力系统进行调峰, 对电厂的稳定运行和节能至关重要。另外, 由于分布式发电在电网中所占的比例越来越高, 基于系统稳定性和经济性的考虑, 分布式发电系统要存储一定数量的电能, 用以应付用电高峰和突发事件。随着电力电子学、材料学等学科的发展, 现代储能技术已经得到了一定程度的发展, 在分布式发电中已经起到了重要作用。

在新能源技术快速发展的大背景下, 如果能在风力发电、太阳能光伏发电等新能源发电设备中都配备有储能装置, 将会更有效的利用电能。首先, 通过储能元件对机组的出力曲线进行调整, 可以解决新能源发电自身出力随机性、不可控的问题, 减小新能源出力变化对电网的冲击; 其次, 可以在电力充沛时储存电能, 在负荷高峰时释放电能, 达到削峰填谷、减少系统备用需求的作用。储能与大容量风力发电系统的结合是可再生能源的重要组成部分。风力发电系统储能装置的作用是在风力强时, 通过风力发电机组向负荷供电, 还可将多余的风能转换为其他形式的能量在储能装置中储存起来, 在风力弱或无风时, 再将储能装置中储存的能量释放出来并转换为电能, 向负荷供电。通过对来自可再生能源的电能的储存与释放, 将会使廉价的不稳定的能源变成稳定的具有较高价值的产品。此外, 电网负荷有高峰和低谷特性, 电力系统的负荷有峰有谷, 用电能储存系统调节电力负荷很有必要。尤其在风力发电厂, 由于风有时候起, 有时候停, 所以高效、安全、可行性高的储能方法和装置对于风力发电场显得尤为重要。

此外, 电池储能技术为解决电力供应链的燃料、发电、输电、配电和用电等问题、实现电网可持续发展提供了全新的途径。近年来随着国家节能减排政策的实施, 储能已经逐渐成为电力生产的第六环节。电力系统引入储能环节后, 可以有效地实现需求侧管理, 消除昼夜间峰谷差, 平滑负荷, 不仅可以更有效地利用电力设备, 降低供电成本, 还可以促进可再生能源的应用, 也可作为提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种手段[1] [2]。

燃料电池(Fuel Cell, 简称 FC)是一种直接将存储在燃料和氧化剂中的化学能转化为电能的发电装置。燃料电池的发电原理与其他化学能源一样, 即电极提供电子转移的场所, 阳极发生燃料(如氢气、甲醇和天然气等)的催化氧化反应, 阴极发生氧化剂(氧气或空气)的催化还原反应, 电解质将燃料电池阴极和阳极分隔开并为质子提供迁移的通道, 电子通过外电路做功并构成电的回路。但燃料电池的工作方式与常

规化学电源不同, 而是类似于汽油机或柴油机, 即燃料电池的燃料和氧化剂不存储在电池内部。电池发电时燃料和氧化剂通过外部的存储装置连续不断的送入电池内部, 电化学反应后部分未反应完的气体和反应生成物排出电池, 同时有一定的热量生成[3] [4]。因此只要源源不断的供应燃料, 就可以得到持续不断的电能。

由于燃料电池仅是一种发电装置, 而且规模可大幅放大至兆瓦级电站, 其发电容量完全取决于燃料存储的多少, 因此燃料电池发电规模和容量可控可调, 相对于传统电池系统具有巨大优势。相对而言, 电解池储能系统是基于燃料电池的一个可逆的系统。当燃料电池逆向操作时, 则是将电能转化为燃料能源进行能源存储, 也就是电能存储的过程。与燃料电池类似, 电解池本质上仍然是能量转化装置, 除了具有燃料电池如规模大效率高特点外, 电解池进行电能存储时的容量完全取决于燃料存储规模。而当燃料电池和电解池相互可逆操作时, 即形成了可逆储能电池系统, 可以通过燃料电池模式进行发电也可以电解池模式用于电能存储。

## 2. 基于燃料电池的储能电池系统能量管理

储能电池系统的科学管理可有效提高电池系统的能量转换效率, 尤其是针对具有典型特点的储能电池系统例如高温储能电池系统。而对于燃料电池储能电池系统来说, 由于其在较为宽泛的温度范围都有不同种类的燃料电池系统, 因而能量管理技术和方法也不尽相同[5] [6] [7] [8]。从可逆燃料电池的运行温度来说, 可以粗略地将电池系统分为如下两大类, 即低温储能电池系统和高温储能电池系统[9] [10] [11], 如图 1 所示。例如, 目前已经大规模商业化应用的质子交换膜电池系统和碱性电池系统基本都是属于低温操作的范畴, 最高温度一般不超过  $100^{\circ}\text{C}$ , 这类储能电池系统可满足大规模的商业化储能, 也可以应用于应急电源和军事方面, 包括当前最先进的 AIP 静音潜艇等则是依赖于质子交换膜电池系统。而紧随其后的则是磷酸盐电池系统, 其操作温度范围一般都在近  $200^{\circ}\text{C}$ , 已经成熟应用于航天科技和太空科技作为备用电源。随着操作温度的升高, 储能电池系统的能量转换效率逐步升高, 主要是由于高温操作可以大幅提高电极动力学从而提高系统的能量转换效率。

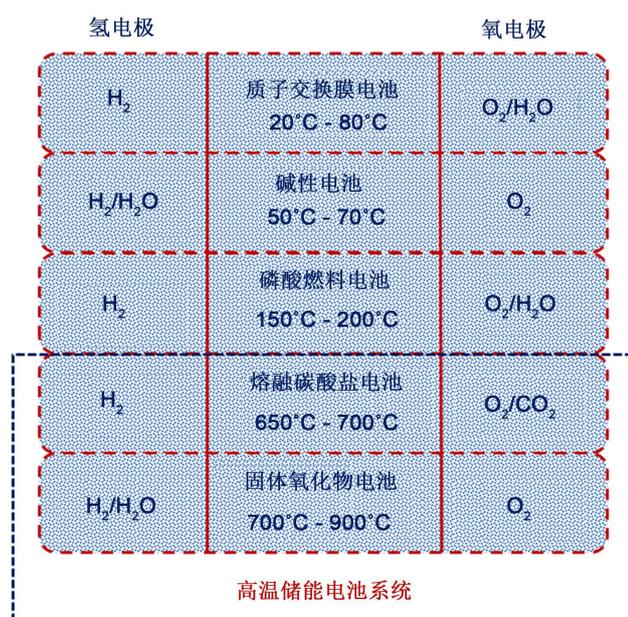


Figure 1. The schematic of reversible fuel cells with different temperatures and fuel requirements [12]

图 1. 不同类型的可逆燃料电池工作温度区间及燃料要求[12]

## 2.1. 低温储能电池系统的能量管理技术

储能电池系统的能量管理系统是一个复杂而庞大的系统, 主要包括电池管理系统、热能管理系统以及其他辅助系统例如气路管理系统等。电池管理系统是连接储能电池系统和用户/负载的重要纽带, 其主要功能包括: 电池物理参数实时监测、电池状态估计、在线诊断与预警、充/放电与预充控制、均衡管理和热管理等。目前电池管理系统在电动汽车等方面已经广泛使用, 通过电池管理系统可以有效控制电池系统的动力输出等, 同时也可以检测诸多关键参数。

如上所述, 储能电池系统本质上是通过电化学反应实现能量转换, 电池管理系统仅从技术角度实现能量有效利用而并未增加电池系统的能量转换效率。而燃料电池是一种对氢能进行利用的能量转换装置, 它可以连续地将燃料和氧化剂的化学能通过电化学反应直接转换成电能, 同时释放热量。而热能的有效存储与利用则是直接提高储能电池系统能量转换效率的有效方法。

通常来说, 对于不同温度区间的储能电池系统, 则需要不同的能量管理方法。例如, 当前已经商业化的质子交换膜储能电池系统(proton exchange membrane fuel cell, 简称 PEMFC), 是一种典型的低温储能电池系统, 其工作温度仅为  $60^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ , 这与环境的温差并不大。即便如此, 该储能电池系统所产生的能量, 有近 50% 左右可以通过热量的形式排放到环境当中, 因而热管理是目前研究的重点之一, 有效管理电池运行时产生的水和热, 对提高电池系统的性能起着至关重要的作用。因此, 对质子交换膜电池系统的水和热管理则成了能量管理的核心, 也是保证电池高性能和效率的关键。对于工作温度在  $200^{\circ}\text{C}$  及以下的储能电池系统而言, 热能管理的核心是维持储能电池高效运行, 同时通过热能再利用提高系统的能量转换效率。

以质子交换膜电池系统为例, 通过有效的热能管理, 可以控制系统的工作温度范围。要使电堆能够高效、稳定运行, 须将其工作温度控制在  $70^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$  之间的最佳工作温度范围。热能管理的另一重要用途就是控制温度极限。储能电池系统的大部分部件都要求在某个温限以下工作, 因此需要控制温度极限。例如, 如果储能电堆的某个局部温度高于  $100^{\circ}\text{C}$  时, 则会将电解质膜内水蒸气直接蒸发并将会出现微孔, 使燃料气氢气出现泄漏并将会导致严重的安全事故。质子交换膜电池系统的热管理就是对电池系统内部的热量的生成与传递、温度场分布和冷却方式进行研究, 包括如何使电池内部产生的热量排到外部、保证在时间和空间上温度均匀分布, 避免过热点的出现, 并且为保证电池好的总效率需要冷却循环的泵功率损失最小化, 即增加热交换能力的同时使压力损失最小[13] [14] [15]。

质子交换膜储能电堆在大功率运行时, 设计的能量转换效率在 40% 左右, 小功率运行时可达 60%。因此, 当电池堆工作时, 有 40%~60% 的废热必须排出, 否则, 这部分热能的产生和累积会使电堆温度上升。有研究称, 当 PEMFC 电池堆的工作温度偏离其理想温度  $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$  时, 系统性能下降 60%。因此, 维持合理的电池堆工作温度是热管理子系统的任务之一。千瓦级电池堆广泛采用冷却水循环排热。如果冷却水和电池堆之间温差较小或者冷却水的流速较慢, 都会限制电池堆的循环冷却过程。当系统还要向用户提供所需要的热能时, 热能管理又增加了一个任务, 就是回收和存储系统内部可利用的热能, 以争取最大效率地实现热电联供。该过程通过热能的传递和存储设备来实现。

相对于传统的质子交换膜储能电池系统不超过 60% 的发电效率, 将系统进行热电联供时效率高达 80%, 而且可以灵活利用多种燃料, 一定程度上有助于缓解地球上的能源短缺问题。而且, 燃料电池可以方便地连接电网, 或者与现有的蓄电池、可再生发电技术相结合, 实现混合发电和储能系统。因此, 发展分布式发电和热电联供技术, 通过控制成本必将占领未来市场相当的份额。美国、日本、加拿大、欧盟等国家都建立了巨额基金项目, 支持热电联供方面的研究。已经有越来越多的综合示范项目, 各种小规模发电系统也不断问世, 部分已经商业化出售。

加拿大 Ballard 公司开发的 250 kW 的 PEMFC 技术领先, 如图 2 所示, 目前有 4 座电站分别在美国、德国、瑞士和日本进行测试运行。美国 Plug Power 公司早在 1998 年就展示了一台 7 kW 家用热电联供装置 Plug Power 7000。该装置可以满足 280~370 m<sup>2</sup> 住宅的需要, 效率高达 80%, 发电成本比购电便宜 20%~30%, 能节约住宅的燃料费用 20%。目前, Plug Power 和 Vainant GmbH 公司合作, 为德国、荷兰、奥地利及卢森堡等国安装了 13 套燃料电池供电站。日本则对 PEMFC 家用燃料电池市场最为关注, 目标是从 2005 年开始推广家用燃料电池, 到 2010 年普及 210 万个家庭。日本石油公司已经在横滨等城市开始使用家用 PEMFC 系统, 并自 2005 年开始以每套 4200 美元的价格销售。东京天然气公司展示了燃料电池示范住宅, 每年可节约照明和热水费用 3 万至 5 万日元。东芝、日立、三菱重工等也都自行开发并销售部分家用 PEMFC 系统[16] [17]。

例如, 上海交通大学燃料电池研究所针对热电联供技术进行了研究, 并系统研究了 60 千瓦级质子交换膜电池堆同时供给电能和热能的技术及管理方法。如图 3 所示, 60 kW 系统热管理设计目的, 就是通过分析设计系统热能的回收和存储。通过流体之间的热传递过程, 将可以利用的系统热能以热水的形式回收存储, 备用用户使用。与此同时, 协助实现电堆的循环冷却过程, 从而控制电堆操作温度。通过热电联供的方式, 实现能量转换系统的能量转换效率, 利用由于电化学反应等所产生的废热, 从而进一步提高能量利用效率。研究表明, 在不采用废热存储等方式下, 该 60 千瓦级电堆的能量转换效率最高可达 50% 左右, 而其中的 50% 能量则通过热能的形式释放至环境中, 造成能量的损失与浪费。并且, 由于储能电池本身需要冷却系统, 在缺少冷却系统后储能电池系统的工作温度会逐步上升从而导致系统局部温度过热如电解质部件温度超过 10℃ 即开始脱水, 性能逐步衰竭而且容易导致漏气等安全事故。



Figure 2. (left) Ballard Company 250 kW proton-exchange fuel cell stack and (right) the factory based on heat and power cogeneration system

图 2. (左) Ballard 公司额定功率为 250 kW 的质子交换膜储能电池堆; (右) 基于热电联供技术进行热能存储与利用的示范电站

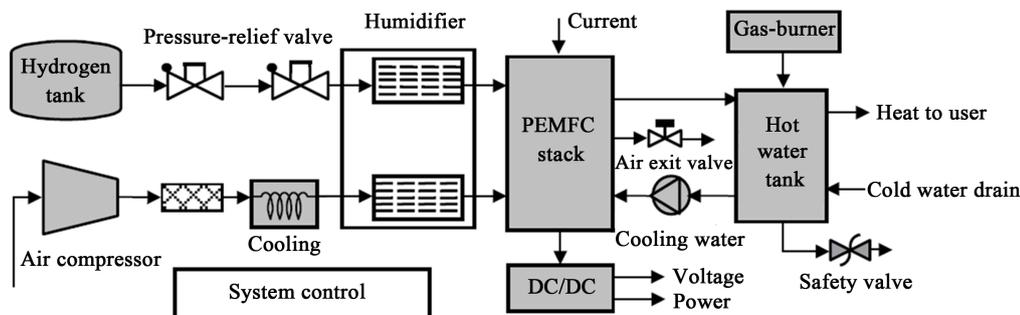


Figure 3. The schematic of cogeneration of electricity and hot water in a 60 KW proton exchange fuel cell stack [18]

图 3. 60 千瓦级质子交换膜电池堆及热电联供系统工作原理及控制系统示意图 [18]

## 2.2. 高温储能电池系统的能量管理技术的现状

相对于低温储能电池系统的能量管理技术而言, 高温电池系统的能量管理则更具有挑战性。例如, 高温操作的熔融碳酸盐电池系统和固体氧化物电池系统的工作温度一般可高达 700℃ 以上, 其系统的热能损失则更为巨大, 而且热能的回收与利用也是当前面临的重要问题。以固体氧化物储能电池系统为例, 为了进一步提高固体氧化物电池储能系统的商业化应用范围并提高其能量转化效率, 将之与当前的能量转换装置相互结合则成了最经济的选择。以固体氧化物为核心部件, 与燃气轮机(即 Gas Turbine, 简称 GT)结合在一起的固体氧化物电池/燃气轮机联合系统[19] [20], 非常适合当前的经济发展水平和固体氧化物技术特点, 如图 4 所示, 被认为是最有前景的固体氧化物电池发电系统之一。固体氧化物电池系统高温运行, 其产生的废热可以通过与发电厂燃气轮机联合, 为联合循环发电系统的其他部分提供热源。固体氧化物电池/燃气轮机联合系统的排烟气体还含有可以再利用的中低温余热, 可以联合热力系统与有机朗肯循环, 提高能源的利用效率。

美国西屋科技中心和北方研究工程公司最早研制出联合循环装置。他们在 1995 年开发出功率为 220 千瓦的第一代联合循环装置, 美国国家能源技术实验室试图开发第二代联合循环装置。他们的研究对象是 20 兆瓦以下的联合循环装置, 其研究结果显示, 在 20 兆瓦的联合循环装置系统中其能量效率最高可达 70%。P. Costamagna 等研究了 300 千瓦级的可信网络监控的固体氧化物电池混合发电系统分别在设计工况和变工况下的性能。在此系统中微型燃气轮机功率约为 50 千瓦, 固体氧化物电池系统发电功率为 250 千瓦。设计工况下总的发电效率为 60%, 而变工况条件下的发电效率则为 50% 左右。P. Costamagna 等在其文章中指出, 可以通过燃气轮机的转速来控制电池和燃气轮机部分的功率比值, 从而使电池和燃气轮机合理匹配以达到更高的发电效率。但其没有研究该混合系统在设计工况下的合理匹配的最佳设计点, 即: 混合发电系统的效率最高的工作条件。

固体氧化物电池储能系统除了与燃气轮机等相互组合使用以外, 作为分散式储能电站广泛用于家庭用电、社区供电等, 如图 5 所示。家庭用电、社区用电由于季节变化和昼夜变化等因素导致的电能需求不平衡, 因此影响了电网稳定性, 固体氧化物电池储能电站对此问题提供了解决的可能。固体氧化物电池储能系统根据当地具体燃料使用情况选择天然气或者煤气作为燃料发电, 给家庭电器供电, 剩余电量可用储蓄电池存储或者连接智能电网传送, 高热量的尾气通过换热器为城市或家庭室内供暖或用于加热生活用水。

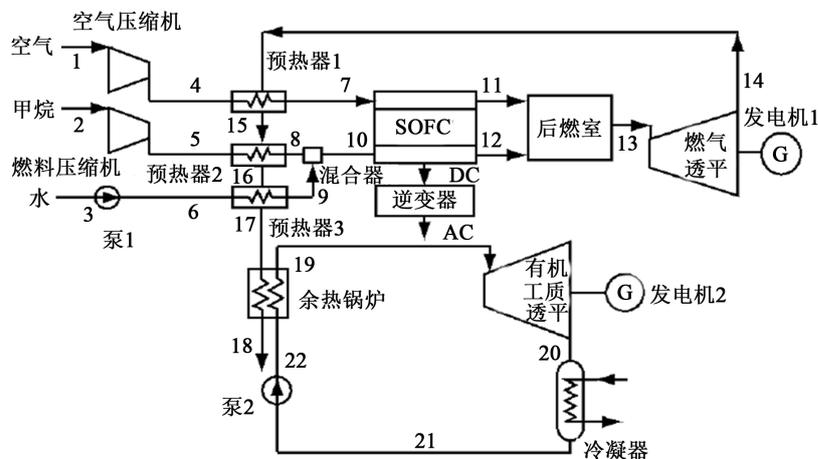


Figure 4. The schematic of the combination of solid oxide cell system and ORC  
图 4. 基于固体氧化物燃料电池系统的有机朗肯循环发电系统示意图



**Figure 5.** The commercial distributed station based on solid oxide cell system  
**图 5.** 商业化的固体氧化物电池储能系统分散式储能电站

Bloom Energy 公司已经生产出商业化发电系统供社区和居民家庭供电。Bloom energy 公司开发了“冰箱式的家用发电站，命名 Bloom Box，如图 6 所示，它可在十年内为美国家庭提供低成本、环保无污染的电力”[21]。Bloom Box 的核心部件就是固体氧化物电池，如图 7 所示。该燃料电池采用陶瓷材料制成，其工作温度为 800℃，效率可达到 50% 以上。与原来的燃料电池材料不同，Bloom energy 公司没有采用昂贵金属，而是采用了氧化锆，该材料可用成本极低的普通砂子制造而成，因此其成本更低。它能够利用各种烃类燃料发电，但整个发电过程这些原料不会燃烧，如果采用非化石燃料能源，它几乎能够做到零排放。

虽然固体氧化物电池系统经过热电联供技术可与涡轮机共同使用，有效利用高温废热，可以使得系统能量效率大于 70%，而对于一个可逆固体氧化物电池储能系统来说，电能在该可逆系统内部的循环效率则是评价电能可逆存储的关键技术指标之一[22]。当前，达到商业化大规模批量化生产要求的电能循环效率的技术指标是国际公认的 80%。而通过热电联供等技术联用仅能在燃料电池模式下提高能量转换效率至 70%，而当储能电池系统处于电解池模式下进行充电时，热电联供技术所能提高的能量转换效率幅度则微乎其微。通过系统的热能管理，充分利用系统的热能，可以在一定程度上调节系统操作温度，因此系统的热能管理对于提高系统电能循环效率极为重要。热能管理可以有效提高循环效率，但同时可逆高温热能存储与释放本身就是一个复杂的技术，它涉及了加热和冷却过程中的电能存储、产生与利用，也是一项非常复杂的系统工程。

### 3. 展望

通过本论文综述，我们发现通过热电联供技术可以解决低温储能电池系统的提高能量效率的关键技术问题，而高温储能电池系统由于操作温度高，热能存储与利用难度大等问题，即使采用热电联供技术



**Figure 6.** The “Fridge” electricity station

**图 6.** 冰箱式家庭用储能电站图



**Figure 7.** The inner structure of “Fridge” electricity station developed by Bloom Energy

**图 7.** 冰箱式家庭用储能电站内部结构

也仅可在燃料电池模式下将能量效率提高至 70%，而在电解池模式的能量效率提高仍然是我们面临的棘手难题。而对于高温储能电池系统而言，电能的循环存储效率达到商业化要求的 80% 这一标准，才能达到大规模批量化生产的基本条件，因此提高系统的电能效率势在必行。

如前所述，高温电池系统的能量损失是导致电能效率较低的关键因素。当高温储能电池系统处于燃料电池模式下，是化学能转化为电能的放热过程，而当处于电解池模式下则是处于电能转化为化学能的吸热过程。由于高温电池系统的操作温度高达 700℃~900℃，如何有效利用系统高温热能则成了提高电能循环效率的关键因素之一。

## 基金项目

国家自然科学基金重大研究计划：碳基能源转化利用，编号：91545123。

## 参考文献 (References)

- [1] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012(2): 1674-3814.
- [2] 吴战宇, 袁顾立, 贞袁, 朱明海. 蓄电池在电网储能系统中的应用[J]. 电池工业, 2012, 17(4): 234-238.
- [3] 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]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [4] Okada, K.Y. (2001) Development of Polymer Electrolyte Fuel Cell Cogeneration Systems Forresidential Applications. *Fuel Cells*, **1**, 72-77. [http://dx.doi.org/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1<72::AID-FUCE72>3.0.CO;2-P](http://dx.doi.org/10.1002/1615-6854(200105)1:1<72::AID-FUCE72>3.0.CO;2-P)
- [5] 代倩. 多能源复合型电动汽车充换储放电站的能量管理技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [6] 徐梁飞. 燃料电池混合动力系统建模及能量管理算法仿真[J]. 机械工程学报, 2009(45): 141-147.
- [7] 张琴. 燃料电池汽车动力系统能量管理策略研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [8] 董婷婷. 增程式电动车能量管理及电池寿命研究[D]: [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [9] 田瑞雪. 微型燃料电池能源系统管理设计研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [10] 张文涛. 微小型燃料电池混合电源能量管理策略研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [11] Sakhare, A.R., Davari, A. and Feliachi, A. (2004) Control of Solid Oxide Fuel Cell Fur Stand-Alone and Grid Connection Using Fuzzy Logic Technique. *Symposium on System Theory*, **36**, 551-555.
- [12] Cowina, P.I., Lan, R., Zhang, L., Petit, C.T.G., Kraft, A. and Tao, S.W. (2011) Study on Conductivity and Redox Stability of Iron Orthovanadate. *Materials Chemistry and Physicas*, **126**, 614-618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.01.009>
- [13] 李忠华. 质子交换膜燃料电池热模拟计算[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [14] Sopiart, K., Ramli, W. and Daud, W. (2006) Challenges and Future Developments in Proton Exchange Membrane Fuel cells. *Renewable Energy*, **31**, 719-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.003>
- [15] 葛善海, 衣宝廉, 张华民. 质子交换膜燃料电池模型研究进展[J]. 电化学, 2002(4): 363-375.
- [16] 张颖颖. 质子交换膜燃料电池家庭热电联供系统的仿真分析和控制设计研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [17] Oyarzabal, B. and Ellis, M. (2004) Development of Thermodynamic, Geometric and Economic Models for Use in the Optimal Synthesis/Design of a PEM Fuel Cell Cogeneration System for Multi Unit Residential Applications. *Journal of Energy Resources Technology*, **126**, 21-27. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1647130>
- [18] Zhang, Y.Y., Yu, Q.C., Cao, G.Y. and Zhu, X.J. (2006) Research on a Simulated 60 kw PEMFC Cogeneration System for Domestic Application. *Journal of Zhejiang University*, **7**, 450-457. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.A0450>
- [19] Ebbesen, S.D., Hogh, J., Nielsen, K.A., Nielsen, J.U. and Mogensen, M. (2011) Durable SOC Stacks for Production of Hydrogen and Synthesis Gas by High Temperature Electrolysis. *International Journal Hydrogen Energy*, **36**, 7363-7373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.130>
- [20] Al-Sulaiman, A. and Dincer, I. (2010) Exergy Analysis of an Integrated Solid Oxide Fuel Cell and Organic Rankine Cycle for Cooling, Heating and Power Production. *Journal of Power Sources*, **195**, 2346-2354.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.075>

[21] 贾旭平. 美国 Bloom energy 公司推出固体氧化物电池微型电站[J]. 电源技术, 2010(6): 20.

[22] Entchev, E. (2002) Residential Fuel Cell Energy Systems Performance Optimization Using Soft Computing Techniques. *Journal of Power Sources*, **118**, 212-217. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00096-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00096-X)

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)