

固体氧化物燃料电池—燃气轮机混合发电系统建模与控制的研究现状与进展*

包成 蔡宁生

(清华大学热能工程系 北京 100084)

摘要: 固体氧化物燃料电池—燃气轮机(Solid oxide fuel cell-gas turbine, SOFC-GT)的混合发电系统是未来高效、清洁的发电技术之一,混合系统的建模、优化与控制方面的研究对于系统集成和商业化运行具有重要意义。通过论述国内外在SOFC单电池机理、半经验模型、电池组模型、混合系统模型,以及系统动态模型与分布式发电系统控制等各个层次的研究成果,提出多尺度的自主研发技术路线。发展适合于高燃料利用率和不同燃料组分的单电池机理模型,并简化出更为合理的半经验模型或近似精确解,用于系统级分析;开发具有自主知识产权的部件模型库,进行系统集成设计和匹配优化;遵循V型开发模式,在系统动态特性分析基础上,开发先进的控制算法形成快速控制原型;建立实时控制的硬件在环演示系统,进行SOFC-GT系统的预集成。

关键词: 固体氧化物燃料电池 混合发电系统 多尺度模型库 集成与优化 多变量控制 V型模式

中图分类号: TM911.47 TK14

Research Status and Advances in Modeling and Control of Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Generation System

BAO Cheng CAI Ningsheng

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Solid oxide fuel cell gas turbine (SOFC-GT) hybrid generation system is one of highly-efficient clean generation technologies in the future. Research of modeling, optimization and control of the hybrid system is very meaningful to the system integration and commercialization. By introducing the state-of-the-art achievements including mechanistic and semi-empirical model of single cell, stack model, hybrid system model, system integration and optimization, control-oriented dynamic model and control of distributed generation system, the multi-scale independent research and development strategy are presented. Based on the general mechanistic cell model which is suitable for high fuel utilization and multi-component fuel, more accurate semi-empirical or approximate analytical model can be developed for system-level analysis. Based on building the multi-scale model library with independent intellectual property rights, the platform of design and optimization for steady-state system analysis is provided. In the V-type mode, the advanced control algorithms are developed to form the rapid control prototype based on the analysis of system dynamic characteristics. Meanwhile, the hardware-in-the-loop simulation technology with real-time controller can be used for the pre-integration of SOFC-GT system.

Key words: Solid oxide fuel cell Hybrid generation system Multi-scale model library Integration and optimization Multi-variable control V-type mode

0 前言

固体氧化物燃料电池(Solid oxide fuel cell, SOFC)不仅本身发电效率高,而且废热能级高,可与燃气轮机(Gas turbine, GT)组成高效、清洁的

SOFC-GT混合循环发电系统。同时,由于SOFC的燃料使用范围广,易于CO₂富集分离,SOFC-GT混合循环发电技术未来也可应用于整体煤气化联合循环,优化我国的煤的多联产技术。SOFC-GT混合发电系统的研究已经受到了广泛的关注。

目前,SOFC-GT混合循环发电系统的研发还处于初级阶段,仍然以数值模拟和分析为主。本文针对SOFC-GT系统组成和关键技术,综述了国内外

* 国家自然科学基金资助项目(50706019)。20070313收到初稿,20070927收到修改稿

在 SOFC 单电池模型、系统匹配设计和稳态优化, 以及系统动态模型和控制等各个层次的研究成果。目前 SOFC 机理模型相对完善, 但仍然缺乏适合于高燃料利用率和多燃料组分的通用模型, 且过于复杂, 难以用于系统分析; 由于缺乏自主的完整 SOFC-GT 系统模型库, 国内在系统拓扑和优化匹配方面的工作也较少; 系统控制仍然以基于集总参数的单一变量控制器设计为主, 缺乏系统的多变量耦合控制研究; 同时, 采用半实物仿真的系统预集成方面的研究也很少。

本文阐述了多尺度的自主研发思路。通过发展适合于高燃料利用率和多组分燃料的 SOFC 单电池机理模型, 简化出更为合理的半经验模型或近似精确解, 用于系统级分析; 开发具有自主知识产权的部件模型库, 进行系统集成设计和匹配优化; 通过系统动态特性分析, 开发先进的控制算法; 并通过建立硬件在环演示系统来研究 SOFC-GT 系统的预集成和控制规律。

1 SOFC 原理和系统构成

作为一个电化学反应器, SOFC 中存在着复杂的流动、传热传质和电化学反应过程。当使用生物质合成气或天然气作为燃料时, 在阳极中还会发生水气变换反应、甲烷重整和裂解, 以及 Boudouard 反应和 CO 氢化等化学反应。为了改善电池的高温密封性能和减小极化损失, 在研制新型材料和工艺的同时, 在管式和板式 SOFC 的基础上, 出现了新颖的扁平管式和瓦楞式等结构。目前, 阳极支撑型 SOFC 已经成为中温板式 SOFC 的主流结构。

SOFC-GT 混合发电系统的拓扑结构多种多样, 大体上可以分为顶层和底层循环两类^[1]。在底层循环混合系统中, SOFC、GT 可以分别工作在常压和高压工况, 但是对热交换器的要求高, 同时低压工作时的系统效率较低。而在顶层循环混合系统中, SOFC 作为燃气轮机的前级燃烧器, 工作在高压工况、系统效率较高, 回热器只起预热空气的作用, 对其有效度的要求不高, 但是对其材料、密封和控制方面提出了更高的要求。

图 1 所示为一个顶层循环 SOFC-GT 混合系统的示意图。如图 1 所示, 为了使系统更加紧凑, 往往还采用内部重整、阳极气体回收和阴极气体回收等技术。内部重整可以减小甚至除去外部重整器, 并将重整的吸热反应与 SOFC 的电化学放热反应热量在电堆中直接耦合, 是对系统集成度改善最显著的因素。阳极回收则可以减小或消除燃料重整所需

的水蒸气、降低电堆内部燃料利用率、提高燃烧室出口气体的温度和减小燃料预热所需的热量^[2]。采用喷射泵是进行阳极回收的最有效的方式。阴极气体回收则利用阴极出口气体对入口空气进一步预热, 提高透平中工质的作功能力。图 1 中, 还直接将水蒸气与高温气体混合, 取消了蒸气轮机。另外, 采用电堆网络化(或称电堆分级)技术^[3], 有利于增强电堆冷却, 使电堆温度分布更加均匀以提高系统效率, 减少系统部件, 进一步促进系统集成。

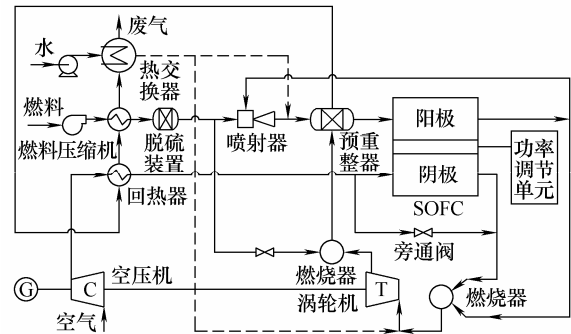


图 1 顶层循环 SOFC-GT 混合系统示意图

在对 SOFC-GT 系统进行稳态特性分析时, 除了系统拓扑结构和子部件间的匹配外, 还应注意约束条件(如 SOFC 最高温度等), 并进行操作条件和热经济成本等的全局优化。另外, 对于小型的 SOFC-MGT 分布式发电系统, 当负荷发生变化时, 系统往往不能在额定设计点工作, 需要合理的系统控制来保证良好的系统动态响应。

2 SOFC 建模与控制研究现状

不同的研究目的要求不同层次和复杂度的 SOFC 模型。

2.1 SOFC 单电池模型

2.1.1 机理模型

相对于微观 SOFC 模型, 宏观 SOFC 机理模型更易于简化为可用于系统分析的 SOFC 模型。表 1 以时间为序, 列出了主要的 SOFC 宏观机理模型。

可见, 近年来 SOFC 的机理模型取得了长足的进步, 已经发展到采用商业 CFD 软件求解三维瞬态模型。在不考虑基元反应、吸附过程等更为复杂的化学和电化学反应时, SOFC 的机理模型可以采用通用的微分方程来描述, 即采用 Navier-Stokes 方程描述动量守恒、气体尘流模型或等效的对流-扩散模型描述多孔介质中的多组分气体传质过程、欧姆定律描述电荷守恒、通用的 Butler-Volmer 方程描述

表1 主要的SOFC宏观机理模型

作者	模型性质和主要工作
DEBENDETTI 等 ^[4]	二维模型, 连续搅拌式反应器建模思路
AHMED 等 ^[5]	交叉流二维模型, 考虑对流换热
HIRANO 等 ^[6]	电流密度和温度分布, 内部重整和气体回收
KAROLIUSSEN 等 ^[7]	文献[7]基础上考虑反应极化和内部重整
ACHENBACH ^[8]	三维瞬态, 内部重整、阳极回收和流动形式
BESSETTE 等 ^[9]	ANSYS 建模, 甲烷内部重整和辐射换热等
FERGUSON 等 ^[10]	三维稳态, 甲烷内部重整和流动形式分析
COSTAMAGNA 等 ^[11]	甲烷部分氧化和重整, 高燃料利用率的影响
IWATA 等 ^[12]	温度和电流密度分布、气体回收率的影响
LEHNERT 等 ^[13]	阳极传质模型, CO 氧化和孔隙率的影响等
NAGATA 等 ^[14]	一维稳态模型, 内部重整、气体回收等
YAKABE 等 ^[15]	STAR-CD 三维模型, 甲烷重整, 流动形式
AGUIAR 等 ^[16]	gPROMS 一维模型, 间接内部重整等
ACKMANN 等 ^[17]	Fluent 二维模型, 阳极结构对传质的影响
RECKNAGLE 等 ^[18]	STAR-CD 三维模型, 流动形式的影响
LI 等 ^[19]	三维模型, 多物理场耦合, 电阻网络等
SUWANWARA-NGKUL ^[20]	H ₂ -H ₂ O-CO-CO ₂ 燃料体系二维模型, H ₂ 和 CO 电化学反应和积炭趋势

电化学反应、能量守恒用于温度场模拟以及在各个方程中考虑化学反应动力学和辐射换热等源项的处理。从这些通用控制方程出发, 国内的研究者也进行了一些类似的工作^[21-22], 同时这些通用的物理定律和控制方程, 也是半经验模型的基础。

2.1.2 半经验模型

相比机理模型而言, 半经验模型更适合于系统分析。表2列出的SOFC半经验模型, 基本上都是围绕操作条件的影响和基于气体传质与电荷传递机理模型, 对SOFC的三种极化损失来进行简化的。

表2 主要的SOFC半经验模型

作者	主要工作
CAMPANARI ^[23]	仅考虑单一操作条件对电池电压的影响
ACHENBACH ^[8]	活化极化的等效电阻 Arrhenius 形式
LAZZARETTO 等 ^[24]	固定电极欧姆极化比例的 TSOFC 欧姆压降
TANAKA 等 ^[25]	忽略电极中径向电流的 TSOFC 欧姆极化
STILLER 等 ^[26]	基于传输线模型的 TSOFC 欧姆极化计算
KIM 等 ^[27]	极限电流和有效电荷传递阻力为拟合因子
CELIK 等 ^[28]	交换电流密度和传递系数等为拟合因子

2.2 系统级 SOFC 模型

表3列出了主要的系统级SOFC模型。可以看出在系统级分析中, 采用轴向分布式参数SOFC模型的重要性; 同时为了简化计算, 前述的半经验模型也较多地运用于沿传质方向的电池极化分析。

2.3 SOFC-GT 混合系统模型

系统级的稳态SOFC模型主要用于分析系统中的能量分配和热力学状态, 表4列出了在SOFC/MCFC-GT混合系统建模上的国内外主要研究机构及其研究成果。

表3 主要的系统级SOFC模型

作者	主要工作
BESSETTE 等 ^[29]	较早的简化SOFC模型、多尺度建模思路
AGUIAR 等 ^[16]	分布式参数模型, 电流密度和热点分析
SONG 等 ^[30]	分布式参数模型, 热传递和流动形式分析
ONDA 等 ^[31]	分布式参数模型, 程氏双流体回收分析
BOVE 等 ^[32]	沿传质方向的一维模型向零维模型的简化
MAGISTRI 等 ^[33]	沿轴向的一维模型和零维模型比较

表4 主要的SOFC-GT混合系统模型

研究机构	主要工作
意大利 Genova 大学 ^[34-35]	满负荷和部分负荷的系统性能, 气体流量、透平转速和旁通阀等的调节策略
美国加州大学 Irvine 分校 ^[36-38]	系统分析工具 APSAT, SOFC-HAT 系统, 阴极回收和电堆分级技术
新加坡南洋理工大学 ^[39]	部件匹配设计方法, 热电联供性能分析, 外部燃烧器运行方式
意大利 Perugia 大学 ^[40]	MCFC-HAT 系统中的旁通阀温度调节
德国 Julich 研究中心 ^[2,8]	基于 Pro/II 的热电联产, 内重整、空气温度、燃料利用率和阳极/阴极回收
Wisconsin-Madison 大学(美国) ^[41]	基于 EES 的家用热电联供, 阳极/阴极回收、全生命周期优化和三种控制模式
瑞典 Lund 大学 ^[42]	电堆网络化技术
挪威科技大学 ^[26]	TSOFC/PSOFC-GT 系统优化操作条件
日本东京大学 ^[43]	30 kW 混合发电系统的集成概念
荷兰 Delft 大学 ^[44]	操作温度对热电联产效率的影响
韩国汉城大学 ^[30]	透平特性的修正, 部分负荷下系统性能
加拿大 Waterloo 大学 ^[45]	基于 AspenPlus TM 的 SOFC-GT 系统分析
清华大学(中国) ^[46]	基于 AspenPlus TM 的系统效率分析
上海交通大学(中国) ^[47]	间接式 MCFC-GT 系统部分负荷性能

2.4 动态模型与控制

2.4.1 面向控制的SOFC动态模型

由表5可见, 面向控制的SOFC动态模型往往考虑气体填充动态和沿轴向的热传递动态, 或将其简化为一阶惯性环节。

表5 主要的面向控制的SOFC动态模型

作者	主要工作
PADULLES 等 ^[48]	仅考虑气体填充动态的小偏差动态模型
AZMY 等 ^[49]	外部重整器和SOFC均为一阶惯性环节
XUE 等 ^[50]	沿轴向热传递动态的分布式参数模型
LUKAS 等 ^[51]	MCFC 显式表达的状态空间模型
HEIDEBRECHT 等 ^[52]	内部重整 MCFC 分布式参数动态模型

2.4.2 燃气轮机发电机组动态模型与控制

表6列出了主要的燃气轮机发电机组动态模型。另外, 这方面的许多工作可以借鉴风机和柴油发电机组等相关研究成果, 限于篇幅这里不作介绍。

表6 燃气轮机发电机组动态模型与控制研究

作者	主要工作
ROWEN ^[53]	较早的燃气轮机通用简化模型
HANNETT 等 ^[54]	GE 和 Woodward 燃气轮机动态模型及控制
潘蕾等 ^[55]	功率无差调节和转速有差调节的串级控制

2.4.3 系统动态模型与控制

相比系统的稳态设计与优化方面的工作,混合系统动态建模和控制方面的研究相对较少。表 7 列出了主要的系统动态模型与控制方面的研究成果。

表 7 主要的系统动态模型与控制研究

作者	主要工作
GEMMEN 等 ^[56]	MCFC 的轴向传热动态模型
TUCKER 等 ^[57]	混合系统的硬件在环(HIL)仿真
ROBERTS ^[47]	NETL 和 NFCRC 的温度控制模式比较,及旁通阀控制等
MAGISTRI 等 ^[35]	阳极喷射器工作压力变化时的系统阶跃响应
LUKAS 等 ^[58]	温度、压差、燃料利用率和汽碳比的分散控制
SHEN 等 ^[59]	MCFC 工作温度的模糊神经网络建模与控制

2.4.4 分布式发电系统负载跟随

系统的负载跟随策略是目前分布式发电系统研究的焦点。许多研究者都通过改变逆变器的调制系数和触发角来进行母线电压和有功功率的调节,并通过调节燃料流量来保持 SOFC 的燃料利用率。文献[60]给出了这种功率伺服算法的控制框图。与其类似,KNYAZKIN 等^[61-63]等均对燃料流量和逆变器进行了鲁棒控制器设计。与之不同,PARADKAR 等^[64]则从负荷频率控制的角度出发进行了适应干扰优化控制器设计,MIAO 等^[65]则基于特征值和模态分析技术,选用对于主导模态而言参与因子较大的状态进行了 LQG 反馈控制器设计。

以上分析表明,SOFC 机理模型已经比较完善;系统优化和匹配设计的工作报道较多;基于动态模型的线性与非线性优化控制器也正被逐渐运用。但是机理模型过于复杂,不适合于系统分析;国内对于系统的拓扑和优化匹配方面的研究报道还很少;大多数面向控制的动态模型基本上都是集总参数模型,而控制器设计也主要是针对单一子系统或单一变量(工作温度或燃料利用率等),缺乏对整个系统的多变量耦合控制,且非线性自适应控制方面的工作也很少。

3 多尺度的自主研发技术路线

SOFC-GT 混合发电系统的建模与控制自主研发同样贯穿着单电池机理模型、系统稳态设计与优化、系统动态分析与控制器设计等多个层次。在 SOFC 机理模型方面:① 应该着眼于传质、电化学反应和化学反应的通用方程,并考虑到多燃料体系的竞争吸附和表面扩散机制,建立适合于高燃料利用率和不同燃料组分的机理模型。② 以一维等温模型为基础,简化边界条件,得到更为合理的半经验模型

甚至近似精确解,用于系统级分析。

在系统稳态设计与优化方面:① 首先应建立完整的部件模型,包括:考虑轴向传热的分布式参数 SOFC 模型、基于神经网络和坐标变换前处理技术的燃气轮机模型^[66]、基于紧凑型热交换器理论的换热器模型^[67]、重整器、增湿器^[67]、喷射器^[68]、燃烧器、旁通阀和功率调节单元(PCU)等部件模型。该模型库具有良好的封装和人机交互,可以针对不同要求的系统灵活组态。② 结合 Matlab、gPROMS 和 AspenPlus 等商用平台,进行系统集成设计和匹配,并可以利用平台中内置的优化算法进行系统全局优化。③ 进一步分析高压/常压系统、内重整、阳极和阴极回收、电堆分级等技术。

在系统动态分析和多变量控制方面:采用 V 型开发模式,即① 以 Matlab 为平台,建立面向控制的 SOFC-GT 系统模型。② 以如表 8 所示的系统动态性能及相应的控制变量为基础,分析系统的输入输出耦合程度,利用相对阶数的解耦矩阵进行模型线性化和鲁棒控制设计,以及采用后退算法和基于神经网络辨识的模型预测控制等的非线性自适应控制策略,形成快速控制原型。③ 在 SOFC 电堆模型和大量的单电池试验数据的基础上,建立 SOFC 模拟器,结合实际的燃气轮机(或以涡轮增压器为 GT 模拟器)、热交换器,构建硬件在环仿真和实时控制平台,进行系统动态分析和控制器验证。在如图 2 所示的演示系统中,通过阀门的切换可以实现顶层和底层循环两种运行模式,结合自动代码生成技术和实时操作系统,进行控制器软硬件平台设计。

表 8 系统动态性能参数和控制变量

系统性能参数	主要控制变量
SOFC 工作温度	空气流量
透平入口温度(TIT)	空气流量、燃烧器补燃量
燃料利用率、电池电压	燃料流量
SOFC 的汽碳比	喷射器工作压力、蒸汽流量
SOFC 阴极和阳极间压差	喷射器工作压力
空压机的喘振裕度	旁通阀开度
功率伺服	逆变器的期望电流

4 结论

本文从 SOFC 原理和系统构成与关键技术出发,论述了国内外在 SOFC 单电池机理和半经验模型、系统级 SOFC 模型、SOFC-GT 混合系统模型,以及系统动态模型与分布式发电系统控制等各个层次的研究成果,并针对目前研究的不足和结合自身已有的研究基础,阐述了 SOFC 混合发电系统建模和控制的多尺度自主研发技术路线。

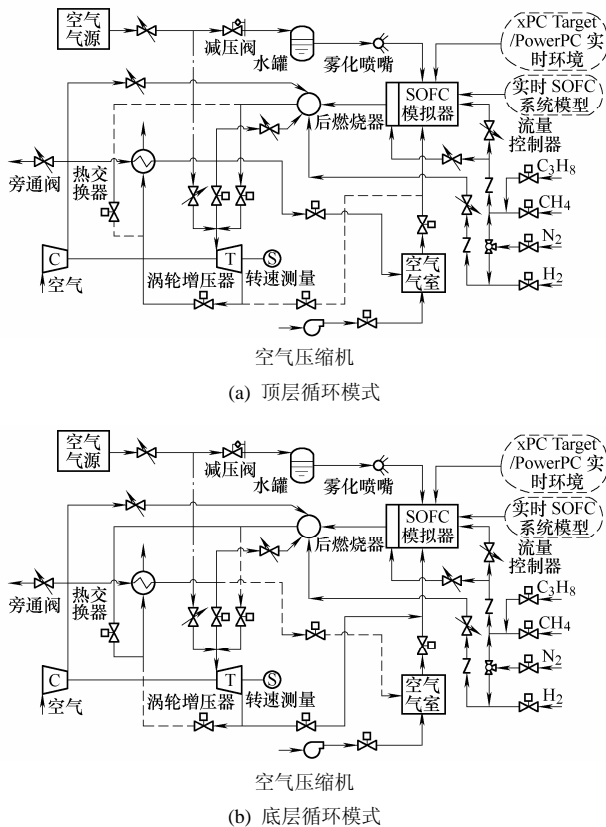


图2 SOFC-MGT 预集成演示系统示意图

参考文献

- [1] MASSARDO A F, LUBELLI F. Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): Part A—Cell model and cycle thermodynamic analysis[J]. *J. of Eng. for Gas Turbines Power*, 2000, 122: 27-35.
- [2] RIENSCH E, STIMMING U, UNVERZAGT G. Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant. Part I- Variation of process parameters[J]. *J. Power Sources*, 1998, 71: 251-256.
- [3] FELLOWS R, SLOETJES E W, OTTERVANGER R. Stack networking for system optimization: an engineering approach[J]. *J. Power Sources*, 1998, 71: 138-143.
- [4] DEBENDETTI P G, VAYENAS C G. Steady-state analysis of high temperature fuel cells[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1983, 38(11): 1 817-1 829.
- [5] AHMED S, MCPHEERTERS C, KUMAR R. Thermal-hydraulic model of a monolithic solid oxide fuel cell[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1991, 138: 2 712-2 718.
- [6] HIRANO A, SUZUKI M, IPPOMMATSU M. Evaluation of a new solid oxide fuel cell system by non-isothermal modeling[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1992, 139: 2 744-2 751.
- [7] KAROLIUSSEN H, NISANCIOGLU K, SOLHEIM A. Mathematical modeling of cross plane SOFC with internal reforming[C]// The Electrochemical Society. 3rd International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, Pennington, New Jersey: The Electrochemical Society, 1993: 868-877.
- [8] ACHENBACH E. Three-dimensional and time dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack[J]. *J. Power Sources*, 1994, 49: 333-348.
- [9] Bessette N F II, WEPFER W J, WINNICK J. A mathematical model of a solid oxide fuel cell[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1995, 142: 3 792-3 800.
- [10] FERGUSON J R, FIARD J M, HERBIN R. Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells[J]. *J. Power Sources*, 1996, 58: 109-122.
- [11] COSTAMAGNA P, Honegger K. Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1998, 145: 3 995-4 007.
- [12] IWATA M, HIKOSAKA T, MORITA M, et al. Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distribution[J]. *Solid State Ionics*, 2000, 132: 297-308.
- [13] LEHNERT W, MEUSINGER J, THOM F. Modeling of gas transport phenomena in SOFC anodes[J]. *J. Power Sources*, 2000, 87: 57-63.
- [14] NAGATA S, MOMMA A, KATO T, et al. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer[J]. *J. Power Sources*, 2001, 101: 60-71.
- [15] YAKABE H, OGIWARA T, HISHINUMA M, et al. 3-D model calculation for planar SOFC[J]. *J. Power Sources*, 2001, 102: 144-154.
- [16] AGUIAR P, CHADWICK D, KERSHENBAUM L. Modeling of an indirect internal reforming solid oxide fuel cell[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2002, 57: 1 665-1 677.
- [17] ACKMANN T, DEHARRT L G L, LEHNERT W, et al. Modeling of mass and heat transport in planar substrate type SOFCs[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2003, 150(6): A783-A789.
- [18] RECKNAGLE K P, WILLIFORD R E, CHICK L A, et al. Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks[J]. *J. Power Sources*, 2003, 113: 109-114.
- [19] LI P W, CHYU M K. Electrochemical and transport phenomena in solid oxide fuel cells[J]. *J. Heat Transfer*, 2005, 127: 1 344-1 362.
- [20] SUWANWARANGKUL R. Model development and validation of solid oxide fuel cells using H₂-H₂O-CO-CO₂ mixtures: From button cell experiments to tubular and

- planar cells[D]. Ontario: University of Waterloo, 2005.
- [21] 汤根土. 平板状阳极支撑固体氧化物燃料电池的实验与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- TANG Gentu. Experiment and numerical simulation for planar anode-supported solid oxide fuel cell[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [22] 李晨. 固体氧化物燃料电池的数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- LI Chen. The numerical simulation of solid oxide fuel cell[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [23] CAMPANARI S. Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module[J]. *J. Power Sources*, 2001, 92: 26-34.
- [24] LAZZARETTO A, TOFFOLO A, ZANON F. Parameter setting for a tubular SOFC simulation model[J]. *J. Energy Resources Technology*, 2004, 126: 40-46.
- [25] TANAKA K, WEN C, YAMADA K. Design and evaluation of combined cycle system with solid oxide fuel cell and gas turbine[J]. *Fuel*, 2000, 79: 1 493-1 507.
- [26] STILLER C, THORUD B, SELJEBO S, et al. Finite-volume modeling and hybrid-cycle performance of planar and tubular solid oxide fuel cells[J]. *J. Power Sources*, 2005, 141: 227-240.
- [27] KIM J W, VIRKAR A V, FUNG K Z, et al. Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1999, 146: 69-78.
- [28] CELIK I, PAKALAPATI S R, VILLALPANDAO M D S. Theoretical Calculation of the Electrical Potential at the Electrode-Electrolyte Interfaces of Solid Oxide Fuel Cells[J]. *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, 2005(2): 238-245.
- [29] BESSETTE N F, WEPFER W J. Prediction of solid oxide fuel cell power system performance through multi-level modeling[J]. *J. Energy Resources Technology*, 1995, 117: 307-317.
- [30] SONG T W, SOHN J L, KIM J H, et al. Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model[J]. *J. Power Sources*, 2005, 142: 30-42.
- [31] ONDA K, IWANARI T, MIYAUCHI N, et al. Cycle analysis of combined power generation by planar SOFC and gas turbine considering cell temperature and current density distributions[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2003, 150: A1569-A1576.
- [32] BOVE R, LUNGHU P, SAMMES N M. SOFC mathematic model for systems simulations. Part one: from a micro-detailed to macro-black-box model[J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2005, 30: 181-187.
- [33] MAGISTRI L, BOZZO R, COSTAMAGNA P, et al. Simplified versus detailed solid oxide fuel cell reactor models and influence on the simulation of the design point performance of hybrid systems[J]. *J. Eng. for Gas Turbines Power*, 2004, 126: 516-523.
- [34] COSTAMAGNA P, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine[J]. *J. Power Sources*, 2001, 96: 352-368.
- [35] MAGISTRI L, TRAVERSO A, Cerutti F, et al. Modelling of pressurized hybrid systems based on integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC) technology[J]. *Fuel Cells*, 2005, 5: 80-96.
- [36] Rao A D. A thermodynamic analysis of tubular SOFC based hybrid systems[D]. Irvine: University of California, 2001.
- [37] ROBERTS R A. A dynamic fuel cell-gas turbine hybrid simulation methodology to establish control strategies and an improved balance of plant[D]. Irvine: University of California, 2005.
- [38] LIESE E A, GEMMEN R S. Performance comparison of internal reforming against external reforming in a solid oxide fuel cell, gas turbine hybrid system[J]. *J. Eng. for Gas Turbines Power*, 2005, 127: 86-90.
- [39] CHAN S H, HO H K, TIAN Y. Modeling for part-load operation of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power plant[J]. *J. Power Sources*, 2003, 114: 213-227.
- [40] LUNGHU P, UBERTINI S. Efficiency upgrading of an ambient pressure molten carbonate fuel cell plant through the introduction of an indirect heated gas turbine[J]. *J. Eng. for Gas Turbines Power*, 2002, 124: 858-866.
- [41] BRAUN R J. Optimal design and operation of solid oxide fuel cell systems for small-scale stationary applications [D]. Madison: University of Wisconsin, 2002.
- [42] SELIMOVIC A, PALSSON J. Networked solid oxide fuel cell stacks combined with a gas turbine cycle[J]. *J. Power Sources*, 2002, 106: 76-82.
- [43] UECHI H, KIMIJIMA S, KASAGI N. Cycle analysis of gas turbine-fuel cell cycle hybrid micro generation system[J]. *J. Eng. for Gas Turbines Power*, 2004, 126: 755-762.
- [44] AU S F, MCPHAIL S J, WOULDSTRA N, et al. The influence of operation temperature on the efficiency of a combined heat and power fuel cell plant[J]. *J. Power Sources*, 2003, 122: 37-46.
- [45] ZHANG W, CROISSET E, DOUGLAS P L, et al. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlusTM unit operation models[J]. *Energy Conversion*

- and Management, 2005, 46: 181-196.
- [46] 史翊翔, 蔡宁生, 李振山. SOFC/Micro-GT 混合循环系统性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(8): 1 142-1 146.
- SHI Yixiang, CAI Ningsheng, LI Zhenshan. Performance analysis of SOFC/micro-GT hybrid system[J]. Tsinghua Science and Technology, 2005, 45(8): 1 142-1 146.
- [47] ZHANG H S, WENG S L, SU M. Dynamic modeling on the hybrid molten carbonate fuel cell-gas turbine bottoming cycle[J]. J. Fuel Cell Sci. Technol., 2005, 2: 94-98.
- [48] PADULLES J, AULT G W, MCDONALD J R. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation[J]. J. Power Sources, 2000, 86: 495-500.
- [49] AZMY A M, ERLICH I. Dynamic simulation of fuel cells and micro-turbines integrated with a multi-machine network[C]// IEEE. Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: IEEE, 2003.
- [50] XUE X, TANG J, SAMMES N, et al. Dynamic modeling of single tubular SOFC combining heat/mass transfer and electrochemical reaction effect[J]. J. Power Sources, 2005, 142: 211-222.
- [51] LUKAS M D, LEE K Y, AYAGH H G. An explicit dynamic model for direct reforming carbonate fuel cell stack[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16: 289-295.
- [52] HEIDEBRECHT P, SUNDMACHER K. Dynamic modeling a cross-flow molten carbonate fuel cell with direct internal reforming[J]. J. Electrochem. Soc., 2005, 152: A2217-A2228.
- [53] ROWEN W I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines[J]. Power, 1983(105): 865-869.
- [54] HANNETT L N, KHAN A. Combustion turbine dynamic model validation from tests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 152-158.
- [55] 潘蕾, 杨瑜文, 林中达. 大型单轴燃气轮机发电机组主控制系统功率调节的设计策略[J]. 发电设备, 2003(6): 5-9.
- PAN Lei, YANG Yuwen, LIN Zhongda. Power control design philosophy of a large single shaft gas turbine-generator set's main control system[J]. Power Equipment, 2003(6): 5-9.
- [56] GEMMEN R S, LIESE E, RIVERA J G, et al. Development of dynamic modeling tools for solid oxide and molten carbonate hybrid fuel cell gas turbine systems[C/CD]// American Society of Mechanical. 2000 ASME Turbo Expo, Munich, Germany: ASME, 2000: 2000-GT-0554.
- [57] TUCKER D, LIESE E, VANOSDOL J, et al. Fuel cell gas turbine hybrid simulation facility design[C/CD]//ASME. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, LA: ASME, 2003.
- [58] LUKAS M D, LEE K Y, AYAGH H G. Modeling and cycling control of carbonate fuel cell power plants[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10: 197-206.
- [59] SHEN Cheng, CAO Guangyi, ZHU Xinjian, et al. Non-linear modeling and adaptive fuzzy control of MCFC stack[J]. J. Process Control, 2002, 12: 831-839.
- [60] LI Y H, RAJAKARUNA S, CHOI S S. Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid-connected system[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007(22): 405-413.
- [61] KNYAZKIN V, SODER L, CANIZARES C. Control challenges of fuel cell-driven distributed generation[C/CD]// IEEE. Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy: IEEE, 2003.
- [62] SEDGHISIGARCHI K. Solid oxide fuel cell as a distributed generator Dynamic modeling, stability analysis and control[D]. Morgantown: West Virginia University, 2004.
- [63] JURADO F, SAENZ J R. Adaptive control of a fuel cell-microturbine hybrid power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18: 342-347.
- [64] PARADKAR A, DAVARI A, FELIACHI A, et al. Integration of a fuel cell into the power system using an optimal controller based on disturbance accommodation control theory[J]. J. Power Sources, 2004, 128: 218-230.
- [65] MIAO Z, CHOUDHRY M A, KLEIN R L, et al. Study of a fuel cell power plant in power distribution system—Dynamic model and stability control[J]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2004, 2: 220-2 231.
- [66] BAO Cheng, OUYANG Minggao, YI Baolian. Modeling and optimization of the air system in polymer exchange membrane fuel cell systems[J]. J. Power Sources, 2006, 156: 232-243.
- [67] BAO Cheng, OUYANG Minggao, YI Baolian. Analysis of the water and thermal system in proton exchange membrane fuel cell systems[J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2006, 31: 1 040-1 057.
- [68] BAO Cheng, ZHANG Kexun, OUYANG Minggao, et al. Dynamic test and real-time control platform of anode recirculation for PEM fuel cell systems[J]. J. Fuel Cell Science and Technology, vol.3, August, 2006, European Fuel Cell Technology and Applications 2005, 3: 333-345.
-
- 作者简介: 包成, 男, 1976年出生, 博士。主要研究方向为燃料电池发电系统、混合动力系统等先进能源系统的建模、优化与控制。
- E-mail: baocheng@mail.tsinghua.edu.cn