

便携式固体氧化物燃料电池系统控制 研究现状与进展

王雨晴¹, 童欣¹, 袁磊²

(1. 北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京市 海淀区 100081;

2. 北京特种车辆研究所, 北京市 丰台区 100072)

Research Status and Advances in Control of Portable Solid Oxide Fuel Cell Systems

WANG Yuqing¹, TONG Xin¹, YUAN Lei²

(1. National Key Laboratory on Electromechanical Dynamic Control, Beijing Institute of Technology, Haidian District,

Beijing 100081, China; 2. Beijing Special Vehicle Research Institute, Fengtai District, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: Solid oxide fuel cell (SOFC) is a clean energy conversion technology which features in high energy density and high efficiency. These features make SOFC a potential candidate in mobile and portable power applications, such as remote power, auxiliary power, individual power, and etc. Research on system control strategies will promote the realization and application of portable SOFC systems. In this paper, the main components and working principle of a portable SOFC system were introduced at first. Then, the research on dynamic characteristics, control requirements, control strategies and control algorithms of portable SOFC systems were summarized and reviewed. Finally, some suggestions were proposed for the future development of the portable SOFC system control strategy.

KEY WORDS: solid oxide fuel cell; portable system; dynamic characteristic; control strategy; control algorithm

摘要: 固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)因其高能量密度、高效率、清洁环保的特点,在远程电源、辅助动力、单兵电源等移动便携电源领域具有广阔的应用前景。便携式SOFC系统控制策略的研究对其实物搭建及产品化运行具有重要意义。该文首先介绍了便携式SOFC系统的结构及工作原理,随后总结归纳了国内外在便携式SOFC系统动态特性、控制需求、控制策略及控制算法等方面的研究进展;最后,在此基础上提出了未来便携式SOFC系统控制领域的发展方向。

关键词: 固体氧化物燃料电池;便携系统;动态特性;控制策略;控制算法

0 引言

燃料电池可以将燃料的化学能直接转化成电能,是一种清洁、高效的能源转化装置^[1],可广泛

应用于固定式、分布式电站以及移动、便携电源等领域。相比于锂电池,燃料电池具有能量密度高、续航时间长的优势,在现场充电、远程电源和辅助电源等移动便携电源领域独具应用前景^[2-3]。与其他类型燃料电池相比,固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)燃料适应性强^[4],可使用烃类燃料甚至氨气^[5]作为燃料;此外,其电极电解质材料为陶瓷材料,可显著降低燃料电池的成本,因此,近年来针对便携式SOFC系统的研究逐渐深入。

燃料电池系统是以燃料电池为核心,配以气体供应子系统、热管理子系统、电控子系统等组成的发电系统,是典型的多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)系统,具有极强的非线性特点。稳定可靠的控制系统可以保证燃料电池系统稳定运行,甚至在受到外部干扰时也可以调节回稳定的工作状态。燃料电池系统的不同控制策略已经得到广泛的研究与讨论,整体上需在建立系统稳态、动态特性模型的基础上,基于系统特性和用户需求解决系统的控制问题。便携式SOFC系统在功能上的特殊性对系统控制层面提出了更多的需求,如负载跟踪、即时启停、抑制积碳等。针对便携式SOFC系统控制策略的研究对其实物搭建及产品化运行具有重要意义。

本文主要介绍了典型便携式SOFC的系统结构,从动态运行特性、控制需求、控制策略、控制算法等角度系统综述了近年来国内外针对便携式SOFC系统控制问题的研究现状与进展,并基于研

究现状探讨了便携式 SOFC 系统控制研究需要解决的问题及发展方向,可为后续便携式 SOFC 控制领域的研究提供一定的参考。

1 便携式 SOFC 系统结构

便携式 SOFC 系统可以独立地为用户提供电能,其稳定运行需要多个互相联系的子系统协调配合,通常分为气体供应系统、电堆系统、尾气燃烧系统、余热回收系统、电力调控系统等^[6],如图 1 所示。

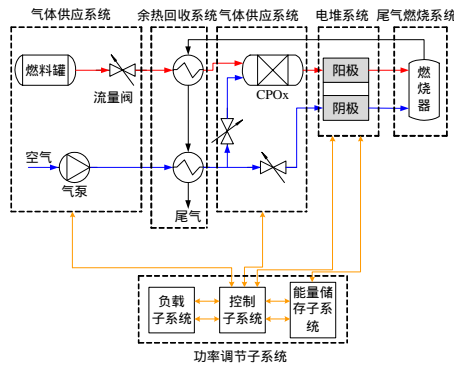
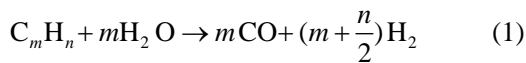


图 1 便携式 SOFC 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of a portable SOFC system

相比于氢气,碳氢燃料易储存、能量密度大,因此,便携式 SOFC 系统通常采用碳氢化合物作为燃料。在实际应用中,为提升电池的性能,需采用外部重整器将碳氢燃料重整为 H₂ 与 CO,再输入 SOFC 电堆进行发电。按重整反应的氧化剂不同,SOFC 系统的重整方式可分为 3 种,即蒸汽重整 (steam reforming, SR)、催化部分氧化重整 (catalytic partial oxidation, CPOx)、自热重整 (autothermal reforming, ATR)。3 种重整方式的反应式如下:

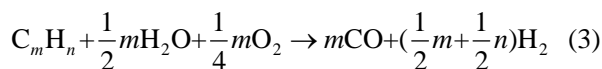
蒸汽重整:



催化部分氧化重整:



自热重整:



由反应式可以看出,蒸汽重整和自热重整的过程都需要大量的外部水,而且吸热的重整反应还需要外部热源供热,会增加便携电源系统的额外负重。而催化部分氧化重整只需要空气或者纯氧作为

氧化剂,同时,其放热特性与快速响应特点使其相比于其他重整方式更适用于便携式 SOFC 系统。

在典型的使用碳氢燃料的便携式 SOFC 系统中,气体供应系统需为重整过程以及 SOFC 电堆提供所需的燃料和空气。如图 1 所示,燃料气体从燃料罐流出,经换热器换热后进入 CPOx 反应器中重整;空气从外部环境经气泵加压后进入换热器,随后分别进入 CPOx 反应器和电堆阴极。气体供应系统的主要工作是通过流量阀,调整 3 股气流的流量,为 CPOx 重整过程和 SOFC 电堆的正常工作提供充足且合适的气量。

重整后的 H₂ 与 CO 进入 SOFC 电堆,电堆是便携式 SOFC 系统的核心,是电化学反应发生的场所。SOFC 将储存在燃料中的化学能转化为电能,随后输送给电力调控系统。SOFC 电堆由若干单电池并联或串联而成,SOFC 单电池由阴极、阳极、电解质组成,其中阴极发生氧化剂的还原反应,阳极发生燃料的氧化反应。工作原理如图 2 所示,氧气持续通入阴极,具有催化作用的阴极将 O₂ 还原为 O²⁻,O²⁻ 作为电解质中的导电离子,在浓度梯度的作用下从阴极传递到阳极,与阳极的 H₂ 与 CO 反应生成 H₂O 和 CO₂,同时,阳极氧化反应生成的电子经外电路传导至阴极,从而产生电流。

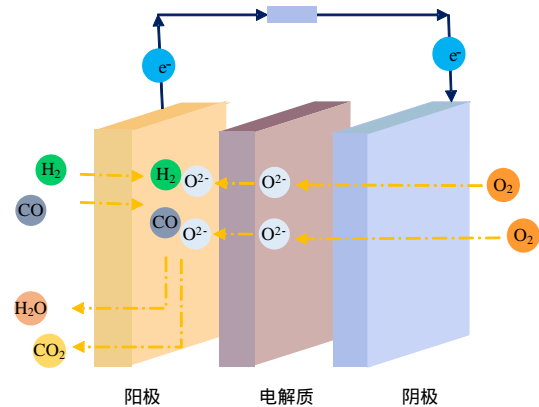
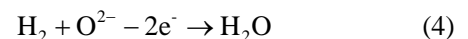


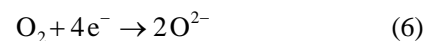
图 2 SOFC 工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of SOFC

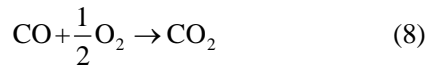
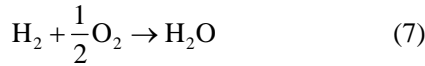
氢气、一氧化碳在阳极发生的氧化反应为:



氧气在阴极发生的还原反应为



SOFC 内部发生的总反应为:



电堆阳极出口部分未反应的尾气通过尾气处理系统处理。未反应的尾气中含有的 H_2 与 CO 在燃烧器中燃烧，燃烧后的尾燃气会通入换热器为入口气体加热，因此，尾燃气的温度控制是保证换热效率的重要环节。余热回收系统通过换热器将 SOFC 尾气中的热能回收利用，用于预热入口的燃料及冷空气，达到余热循环利用的目的。

电力调控系统可以分为能量储存子系统、负载子系统、控制子系统。能量储存子系统负责储存燃料电池产生的多余电能；负载子系统分为内部负载和外部负载，内部负载为控制子系统提供电能，外部负载为用户提供电能；控制子系统包括控制器、传感器、流量阀等，传感器反馈回的信号反馈给控制器，控制器传出的信号作用于气泵、阀等装置，实现对系统的控制。

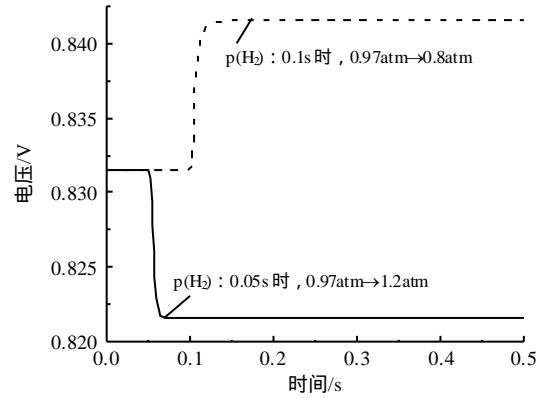
上述这些子系统分工合作、协同配合，共同组成完整的便携式 SOFC 系统。如何控制这些子系统，使便携系统稳定、安全、持续地为用户提供能量，同时使其满足用户复杂的动态变化需求，是便携式 SOFC 系统控制中亟需关注与解决的问题。

2 便携式 SOFC 系统动态运行性能与控制策略

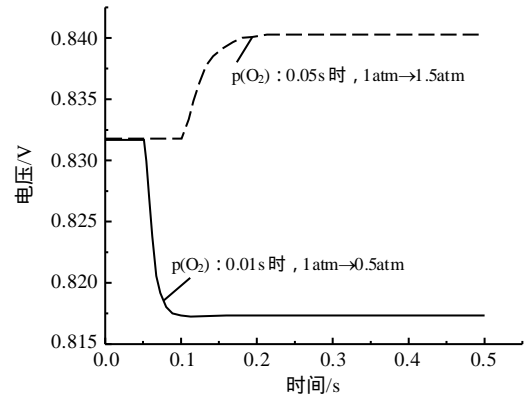
2.1 动态运行性能

相比于固定式发电系统，便携式 SOFC 系统负荷变化更为频繁，需要经常启停、变负载，因此，各项操作条件需要频繁动态变化，SOFC 系统的动态运行性能显著影响其性能与寿命，同时，对系统动态运行性能的研究是制定控制策略、选取合适操纵变量的基础。对便携式 SOFC 动态特性的研究可分为单电池层面、电堆层面以及系统层面(电堆及辅助部件(balance of plant, BOP))的动态特性研究。

在单电池层面的动态运行性能研究中，研究者主要关注操作条件及负载动态变化下电信号以及温度的动态响应。图 3 为单电池在阳极燃料、阴极氧气分压突变时工作电压的动态响应^[7]。如图 3(a)所示，入口燃料分压增大导致开路电压升高，最终表现为输出电压上升，反之燃料分压降低输出电压下降。如图 3(b)所示，入口氧气的分压突然增大同



(a) H_2 分压突变

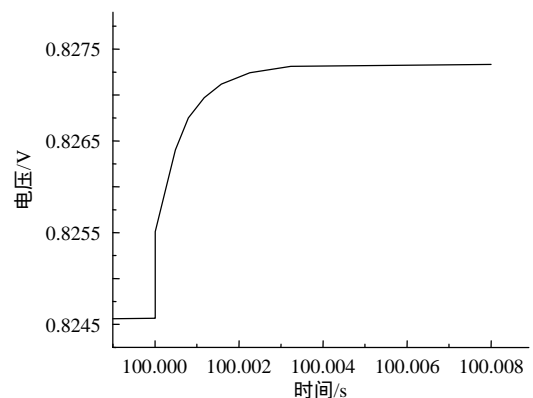


(b) 氧气分压突变

图 3 SOFC 单电池燃料、氧气分压突变时电信号的动态响应

Fig. 3 Dynamic response of electrical signals under sudden changes in fuel partial pressure and oxygen partial pressure

样导致开路电压上升，因此，输出电压上升，反之氧气分压降低输出电压下降。图 4 为单电池在负载突变时的电压、温度响应曲线^[8]。当负载电流阶跃下降时，SOFC 电化学反应消耗的氢气和氧气的量减少，导致阴阳极气体氧浓差上升，进而使开路电压与输出电压上升。而由于电化学反应放热量的减少，电池温度随之略有降低^[9]。响应时间常数是表征动态响应快慢的重要性能指标^[10]，由图 4 中单电池的电压、温度动态变化曲线可知，对于典型的



(a) 电压动态响应

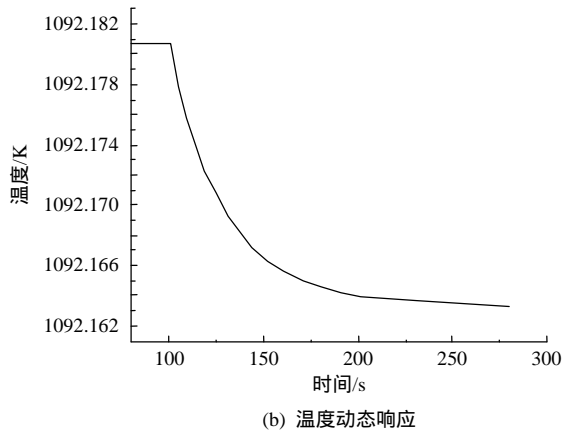


图4 SOFC单电池负载突变时电压、温度的动态响应
Fig. 4 Dynamic responses of voltage and temperature under a sudden load change

SOFC单电池,电信号的动态响应通常在ms级别,温度的动态响应时间则长达上百秒^[11]。

单电池需串联或并联成电堆才能满足实际负载的用电需求,因此,对于便携式SOFC系统的研究更多关注的是SOFC电堆级和系统级的动态响应。SOFC电堆和系统级的响应趋势与单电池类似,由于串并联或者系统其他部件的影响,其动态响应时间与单电池有所不同。在系统层面,不同系统部件的动态响应特性并不相同,SOFC电堆需要与其他子系统部件协调配合以满足负载的动态变化^[12]。表1总结了近年来针对SOFC电堆和系统动态响应的研究工作。

对便携式SOFC系统动态运行性能的研究为制定系统控制策略奠定了基础,基于获得的电堆/系统

表1 SOFC电堆级、系统级动态响应研究工作
Table 1 Research on stack-level and system-level dynamic responses of portable SOFCs

研究类别	作者	主要工作及结论
SOFC电堆	Bae Y等 ^[13]	负载电压突变时,电流动态响应曲线会产生下冲或过冲现象
	Botta G等 ^[14]	电堆用于间歇电源的动态运行时,需控制多个变量(局部温度梯度和燃料利用率)
	Sedghisigarchi K等 ^[15]	建立了非线性SOFC模型,用于研究动态分析阶跃负载和燃料变化时的电压响应
	Wu C C等 ^[16]	研究了SOFC系统在不同欧姆特性下电堆的瞬态响应
SOFC系统	Yang C H等 ^[17]	研究了燃料和空气分配不均对SOFC系统动态性能的影响
	Finnerty C等 ^[18]	微型集成管式SOFC系统可在15min产生全部功率
	Pianko-Oprych P等 ^[19]	在电堆动态模型中调节O/C研究CPOx的温度及输出流量的动态响应

关键参数的动态响应特性,研究者以控制需求为核心调控输入变量对输出变量进行了有效控制。

2.2 控制策略

2.2.1 控制需求

便携式SOFC系统在控制角度关注的问题主要有:温度控制、快速负载跟随、功率分配以及重整积碳等。

温度控制对于SOFC的稳定运行至关重要,SOFC运行及负载变化过程中产生的温度梯度会导致SOFC陶瓷部件产生热应力,造成陶瓷材料的断裂或屈曲进而导致失效,同时,过高的操作温度还会造成密封失效等问题,因此,维持SOFC电堆温度恒定是控制系统至关重要的环节。由2.1节中对SOFC系统的动态运行性能分析可知,受传热因素的限制,各部件温度的变化远比电信号的变化缓慢。相比于固定式SOFC系统,便携式SOFC系统对系统紧凑性的要求更高,难以使用大型外接式换热器对系统进行换热,同时其频繁的负荷变化对温度变化动态响应时间的要求更高,因此,需要深入研究更先进的控制器以满足便携式SOFC对温度控制的需求。

快速负载跟踪一直是燃料电池系统动态控制领域关注的热点问题,需要实时调控便携式SOFC系统的输出功率来满足实时的负载需求。在便携式SOFC系统中,便携系统负载变化频繁、启停迅速;便携负载要求供能设备可以适应其高频的负载变化,因此,相比于固定式SOFC系统,便携式SOFC系统对快速负载跟踪的需求更突出。实现快速负载跟踪的普遍手段是在系统中引进能量储存装置,如锂电池以及超级电容器^[20]。

功率分配是SOFC系统尤其是便携系统极其重要的问题,一般的SOFC系统只需考虑外部负载与BOP系统中需要供电的某些器械(如传感器、气泵等)的功率分配问题。而在便携式SOFC系统中,SOFC以及能量储存装置都可作为负载的电能来源,此外,燃料电池会对能量储存装置进行充电,需在供电与负载两端均协调好功率分配的问题。

便携式SOFC系统的燃料通常为碳氢化合物,高碳氢化合物在重整过程中可能会产生积碳,积碳进一步会堵塞催化剂孔、占据反应活性中心,导致重整器的失效。图5为C-H-O积碳热力学相图^[22],可知入口C/O与积碳密切相关,从热力学角度考

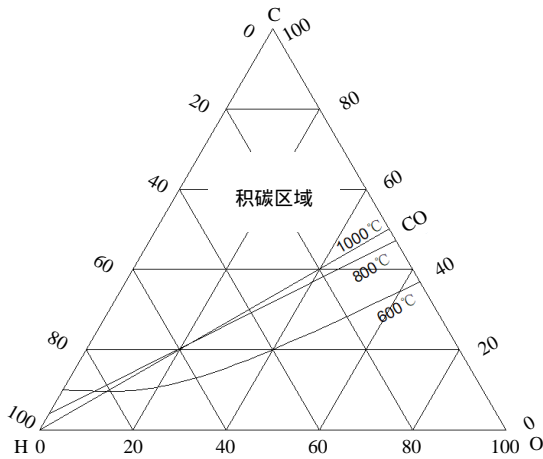


图5 C-H-O 积碳相图

Fig. 5 C-H-O carbon deposition ternary diagram
(Copyright 2000 Elsevier Ltd)

虑,应在相图不积碳的范围内选择合适的重整操作条件。同时,CPO_x重整器需要为SOFC电堆提供充足的H₂、CO燃料,因此,需要其具有较高的重整效率。研究表明,CPO_x的重整效率同样与入口C/O比密切相关^[21],因此,需控制CPO_x入口C/O比,以降低积碳可能性、维持合适的重整效率。

2.2.2 控制策略

合适的控制策略需要面向控制需求,确定控制变量,实现控制目标。SOFC系统虽各有不同,但根据其基本原理的一致性,控制策略大体上是相似的。针对2.2.1节中归纳的控制需求,本节总结了热管理策略、电管理策略以及物质管理策略等类型的控制策略。

1) 热管理需要考虑SOFC电堆内部以及BOP部件中的CPO_x反应器、燃烧室、阴极阳极尾气热回收换热器的热量传递与分配问题^[23]。热管理通过控制电堆的最高温度和温差、燃烧器重整器的温度、入口出口气体的温差,以维持电堆与各BOP部件的运行稳定,从而达到延长使用寿命的目的。由于SOFC电化学反应为放热反应,调控阴极入口空气流量以调整空气与SOFC对流换热强度成为调控电堆温度的重要手段^[24]。

2) 电管理则需要考虑负载、储存和发电的分配问题。在已知需求功率曲线的前提下,合理选择储能元件(如锂电池、超级电容器等),通过需求计算将SOFC产生的电能按需分配给储能元件、BOP系统、外部电路系统,实现当负载变化较大时使用储能元件的能量,负载需求稳定时直接使用SOFC电堆供电,从而延长电池的工作寿命、提高安全性

与稳定性。快速负载跟踪和功率分配问题都属于电管理的范畴。快速负载跟踪需要识别负载的变化并快速做出响应,对于便携式SOFC系统,常规的负载跟随策略是判断用户的需求功率是否在平均功率的取值范围内,如果在则使用SOFC电堆进行供电,若超出或远低于平均功率水平则启用储能装置提供能量。Meadowcroft A D^[25]等开发了一种应用于无人机的SOFC-锂电混合动力系统,在启停等负载变化大的工况下使用锂电池进行快速负载跟踪,此外,如果燃料电池发生故障,无人机依然可以通过外部电池提供的能量飞行和降落。一般的SOFC电堆为了提高电池的效率及使用寿命,通常希望保持恒定或变化不大的温度,而Tucker M C^[26]提供了一种逆向控制思路,利用热震性能好的金属支撑SOFC,通过电池温度的快速变化匹配不断变化的瞬态负载需求。

功率分配问题则集中于探讨SOFC和外部电源对负载在不同状态下的应对方案。Broderick J^[27]等针对无人地面车(unmanned ground vehicle, UGV)燃料电池系统,提出了一种基于整体的功率分配策略,分析了整个动力系统的能量损失和电池的热响应,发现燃料电池和外部电池组成的循环供能系统轮流为负载供能,可以在不损害快速负载的需求前提下良好提升电池的使用时间。在解决军事安防机器人(Packbot)的功率分配问题时,Wang Y^[28]等提出了一种动态分配功率的策略,根据随机采样测量的功率需求分配燃料电池与并联电池或电容器的能量,燃料电池是否会经历周期性启动/关闭取决于整体功率需求水平。当任务的平均功率需求远低于燃料电池功率范围时,不可避免地需要对燃料电池进行缓慢停机或开机。相反,当任务平均功率在燃料电池工作范围内时,最佳策略是使用SOFC跟踪功率需求,并在整个任务期间尽量使SOFC的完全放电,多余的电能用于给外部电池充电。上述功率分配的策略都是基于规则的能量管理策略,除此之外,值得借鉴的是在求解燃料电池-锂电池混合动力系统功率分配问题时,研究者采用基于优化的策略,使用动态规划或者随机动态规划的方法,以控制复合能源的混合度^[29]。

动态规划是求解决策过程最优化的过程,基本思想是把整体问题分解成若干个子问题,整体问题的最优解取决于子问题的最优解;随机动态规划在其基础上加入了随机变量以解决不确定环境的优

化问题。Flentcher T^[30]针对燃料电池混合动力电动汽车功率分配,采用随机动态规划的方法降低了系统的损耗。Bradley T H 等人^[31]采用动态规划的方法,研究燃料电池与蓄电池间功率分配问题,以实现燃料消耗最小的目标。在 SOFC 领域,动态规划算法亦得到了初步的应用,宋春宁^[32]等人利用启发式动态规划的方法,当负载突变时,将 SOFC 神经网络模型的电压控制在一定区间内。

3)热管理和电管理不能完全归纳便携式 SOFC 系统的控制策略,某些情况下研究者更关注系统的关键指标如 C/O 比、燃料利用率等,基于这些关键的物料参数提出的控制策略统一归为物质管理策略。控制重整器入口的 C/O 比预防重整器的积碳问题就是一种物质管理策略。重整反应的启动时间也需关注,研究表明,重整反应启动过早会使部分未重整的烃类燃料进入 SOFC 电堆导致积碳,而启动过晚则会影响重整器的效率和寿命。基于此,Keegan K R^[33]等提出了 CPOx 重整器的启动控制策略,即当催化剂表面温度超过预定值时才开始进行烃类燃料的重整过程。除此之外,基于电流的燃料控制(current-based fuel control, CBFC)也是一种物质管理策略,它是一种根据 SOFC 电流改变燃料流量的控制策略。Mueller F^[34]等指出,当进入系统的燃料流量与电流成比例控制时,燃料利用率将保持不变。利用这个原理,为了保持燃料利用率的稳定,可监测电流的变化,以燃料的消耗速度同步为 SOFC 补充燃料。

上述控制策略均是从需求的角度出发提出的,在明确控制需求的基础上需进一步进行系统控制变量与被控变量的选择和匹配^[35]。便携 SOFC 系统的被控变量一般选择燃料利用率、电堆的出口温度、系统的电功率等;而控制变量则主要是燃料与空气的进口流量等,针对被控/控制变量选取方面的研究工作如表 2 所示。

表 2 SOFC 被控/控制变量研究进展

Table 2 Research on selection of controlled/and control variables

作者	主要工作及结论
Aguair P 等 ^[25]	通过控制温度和燃料利用率实现了对直接内重整 SOFC 系统的开环和闭环动态响应的控制
高丹慧 ^[37]	通过控制系统的功率、空气过氧比、阳极、阴极入口温度实现了对 SOFC 系统的跟踪控制
Wongwiwat J 等 ^[38]	提出了一种集成式微管固体氧化物燃料电池的概念,该系统可通过改变温度、燃料流量和当量比实现对系统输出功率的控制

续表

作者	主要工作及结论
Shi W ^[39]	在分析 SOFC-CHP 系统的动态模型时,提出了系统的 3 个关键运行参数:电池电流、过量空气系数和燃料利用率,将这 3 个关键参数进行控制则可良好运行 SOFC 系统
Wang X 等 ^[40]	在实现数据驱动控制时,维持燃料利用率恒定的前提下,保持电压恒定

对于系统控制策略的优化除了可以从操纵变量的角度进行,对系统结构进行改进也可以更好地配合控制策略的改良。比如,很多研究通过添加空气旁路^[36]、烟气旁路等旁通阀进一步实现对温度的控制。增加气道通过增加一个控制变量的方式,可有效改善温度控制的不确定性。

2.2.3 控制算法

合适的控制策略需要通过控制器及控制算法实现对系统的有效控制。目前,针对 SOFC 系统控制器及控制算法开发的相关研究仍较少,然而针对其他类型燃料电池系统,尤其是质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)领域的控制器研究广泛,可为便携式 SOFC 的控制器及算法开发提供极强的借鉴意义。传统的比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制是工业控制中最广泛的控制算法,至今仍广泛应用在燃料电池系统控制的各个领域,SOFC 的温度、流量等参数一般采用 PID 控制。对于单变量控制,通常采用 PID 或比例控制器^[41],设计单回路或多回路以保持 SOFC 恒定的燃料利用率和温度。

SOFC 系统还需要满足一些关于操作工况和外界条件的其他约束,PID 只能控制变量在一定范围内波动,不能使其精准保持在一个稳定值,此时需采用其他先进控制算法,如模型预测控制(model predictive control, MPC)、非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)、自适应控制等。MPC 可以处理 MIMO 系统,对输入和输出的硬约束可以强制执行^[42-43]。Larosa L^[44]等针对 SOFC 系统仿真测试平台设计了两种类型的 MPC 控制器,并与经典的 PID 控制进行了负载跟踪比较,结果表明 MPC 控制器具有更好的稳定性。NMPC 既可以解决温度变化和各输入变量之间非线性关系的问题,同时可以预测系统的动态变化趋势,提前对变化做出响应。表 3 对比了近年来 SOFC 系统常用的控制算法特点及应用场合。

表 3 SOFC 系统控制算法对比及应用研究
Table 3 Research on study and application of control algorithm for SOFC systems

算法种类	特点	研究者及主要工作
PID 控制	原理简单、使用方便、易受影响	Qin Y 等人 ^[45] 设计了两组 PID 控制器，分别控制 SOFC 系统的输出电压和燃料利用率，用遗传算法优化控制器参数
前馈控制	开环控制、在干扰出现的瞬间起作用	Maxime C ^[46] 对阳极烟气再循环的 SOFC-CHP 系统进行前馈控制，保证系统基于安全与效率最大化的运行
MPC	线性模型预测控制、控制好、鲁棒性强	Oh S R ^[47] 为 5kW 的 SOFC-GT 系统时设计 MPC 控制器，在保持温度平稳恒定的情况下实现快速负载跟随 Sanandaji B M 等 ^[48] 通过调节燃料流量和电池电压控制燃料利用率
NMPC	非线性模型预测控制、控制好、鲁棒性强	Wu X 等 ^[49] 利用非线性模型预测控制实现 SOFC 系统的负载跟踪，在其中加入了故障模块，使系统在故障状态下保持温度在设定值范围内
自适应控制	对数学模型的不确定性系统、对数学模型的依赖很小	Das T 等 ^[20] 采用电流调节策略，通过燃料利用的瞬态控制来防止燃料不足，并实现快速负载跟随的目标

3 未来研究方向

SOFC 系统高能量密度、高效率、环保等特点使其逐渐成为未来便携式电源技术发展的重点，然而便携式 SOFC 系统的控制仍有问题亟待解决。SOFC 系统热响应远慢于电信号的响应，而热响应的滞后会进一步导致系统无法满足快速的负载变化，因此，提高热响应速度是研究者一直努力实现的目标。改进电池构型(例如应用微管式 SOFC 可极大提升电池热循环性能^[50])、优化换热方式(例如使用热管进行高效能量管理与快速热量传输^[51])、改进控制方法(例如串级控制方法的应用可大幅提高响应速度^[52])等方式，都可以提高热响应速度，维持燃料电池系统的稳定。

SOFC 系统的安全问题也是系统设计时必须考虑的因素，除了前文提到的积碳问题，在 SOFC 电堆和 BOP 部件中存在大量的热、电、气的耦合，某些参数微弱的变化可能会引起单元部件的损伤及系统性能的衰退，如温度过高导致的密封失效^[53]等问题。因此在便携式 SOFC 系统的开发过程中仍需考虑 SOFC 性能退化引起的安全问题^[54]，可在控制系统中加入安全监测装置，当某些参数超出设定的安全范围时立即报警，并自动采取安全措施，如切断燃料供应等。

随着控制器与控制算法的日趋成熟，可望实现对便携式 SOFC 系统更为精准的预测与控制^[55]。神经网络与机器学习的发展使便携式 SOFC 系统的模拟与控制有了新的发展方向。在模型建立方面，Xu H 等^[56]将多物理场仿真与深度学习相结合，开发出一种混合模型，经训练与优化精度可达 1%，适用于 SOFC 系统的非线性模型的预测和优化；Yuan P 等^[57]建立了神经网络模型，快速、准确预测电池的稳态平均电流密度和最高电池温度，运用神经网络与深度学习可建立更精确的系统模型。神经网络在低温燃料电池系统的控制领域已得到应用，战俊豪等^[58]基于 PID 神经网络控制，在 PEMFC 空气供给模型中控制了过氧比；Chettibi N 等^[59]开发了基于在线训练的神经网络调整参数，以控制光伏-燃料电池-蓄电池混合动力系统。相比于上节所提及的传统控制方法，神经网络控制运算速度快、适应性强、联想能力强、容错性高。以上神经网络在模型建立与系统控制层面的成功应用对未来便携式 SOFC 系统的模拟与控制策略的研究有很大的借鉴意义。

此外，硬件在环开发控制器在 SOFC 系统的应用大大提高了控制算法的开发效率，缩短了试验周期，且可将控制器与复杂的仿真模型联合调试^[60-61]。因此可在已有的 SOFC 电堆模型的基础上，结合实际的换热器、控制器，构建半实物实时仿真及控制平台，进行系统动态分析和控制器验证。

4 结论

本文从便携式 SOFC 的原理及结构出发，从控制需求、控制策略、控制算法等角度综述了国内外便携式 SOFC 系统控制领域的研究现状及成果，并探讨了便携式 SOFC 系统控制研究需要解决的问题以及发展方向。

整体来说，目前 SOFC 系统的稳态/动态模型已形成了很完善的理论体系，而针对便携式 SOFC 系统的控制领域的研究仍处于发展阶段，研究者根据不同的控制需求提出了多种控制策略，同时控制算法也在不断的完善发展之中。

参考文献

- [1] 赵永明, 薛华庆, 张福东, 等. 以煤层气为燃料的固体氧化物燃料电池发电系统的模拟与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1043-1053.
ZHAO Yongming, XUE Huaqing, ZHANG Fudong, et al.

- Simulation and analysis of the coal seam methane fueled solid oxide fuel cell power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1043-1053(in Chinese).
- [2] ADHIKARI P, ABDELRAHMAN M. Modeling, control, and integration of a portable solid oxide fuel cell system[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2012, 9(1): 011010.
- [3] BOUKOBERINE M N, ZHOU Zhibin, BENBOUZID M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: solutions, strategies, and prospects[J]. Applied Energy, 2019(255): 113823.
- [4] PIANESE C, SORRENTINO M. Modeling methodologies for design and control of solid oxide fuel cell APUs[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1159(1): 3-10.
- [5] FARHAD S, HAMDULLAHPUR F. Conceptual design of a novel ammonia-fueled portable solid oxide fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(10): 3084-3090.
- [6] 王萌, 程谟杰, 区定容. 一种便携式固体氧化物燃料电池发电装置及其控制方法: 中国, 108155404A[P]. 2018-06-12.
WANG Meng, CHENG Mojie, QU Dingrong. Portable solid oxide fuel cell power generation device and control method of device: CN, 108155404A[P]. 2018-06-12(in Chinese).
- [7] QI Yutong, HUANG Biao, CHUANG K T. Dynamic modeling of solid oxide fuel cell: the effect of diffusion and inherent impedance[J]. Journal of Power Sources, 2005(150): 32-47.
- [8] HAJIMOLANA S A, SORROUSH M. Dynamic behavior and control of a tubular solid-oxide fuel cell system[C]//2009 American Control Conference. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 2660-2665.
- [9] 康英伟. 固体氧化物燃料电池微型热电联供系统的动态建模、仿真与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
KANG Yingwei. Dynamic modeling, simulation and control of a solid oxide fuel cell micro combined heat and power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010(in Chinese).
- [10] CHOUDHURY A, CHANDRA H, ARORA A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(20): 430-442.
- [11] 王宇磊. 固体氧化物燃料电池稳态与动态特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
WANG Yulei. Steady-State and dynamic analysis of solid oxide fuel cell[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [12] 于泽庭, 蒙青山, 张承慧, 等. CO₂ 近零排放固体氧化物燃料电池冷热电联供系统的性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 200-208.
- YU Zeting, MENG Qingshan, ZHANG Chenghui, et al. Performance analysis of the near zero CO₂ emissions tri-generation system based on solid oxide fuel cell cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 200-208(in Chinese).
- [13] BAE Y, LEE S, YOON K J, et al. Three-dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change[J]. Energy Conversion and Management, 2018(165): 405-418.
- [14] BOTTA G, ROMEO M, FERNANDES A, et al. Dynamic modeling of reversible solid oxide cell stack and control strategy development[J]. Energy Conversion and Management, 2019(185): 636-653.
- [15] SEDGHISIGARCHI K, FELIACHI A. Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel Cells-part I: fuel-cell dynamic model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 423-428.
- [16] WU C C, CHEN T L. Dynamic modeling of a parallel-connected solid oxide fuel cell stack system[J]. Energies, 2020, 13(2): 501.
- [17] YANG Chenghao, CHANG S C, CHAN Y H, et al. A dynamic analysis of the multi-stack SOFC-CHP system for power modulation[J]. Energies, 2019, 12(19): 3686.
- [18] FINNERTY C, ROBINSON C, ANDREWS S, et al. Portable propane micro-tubular SOFC system development[J]. ECS Transactions, 2007, 7(1): 483-492.
- [19] PIANKO-OPRYCH P, HOSSEINI S M, JAWORSKI Z. Model development of integrated CPOx reformer and SOFC stack system[J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2016, 18(4): 41-46.
- [20] DAS T, SNYDER S. Adaptive control of a solid oxide fuel cell ultra-capacitor hybrid system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(2): 372-383.
- [21] MEHRAN M T, PARK S W, KIM J, et al. Performance characteristics of a robust and compact propane-fueled 150 W-class SOFC power-generation system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(12): 6160-6171.
- [22] EATON S C, SUNKARA M K. Construction of a new C-H-O ternary diagram for diamond deposition from the vapor phase[J]. Diamond and Related Materials, 2000, 9(7): 1320-1326.
- [23] 杨博然, 陈志光, 秦朝葵. 固体氧化物燃料电池(SOFC) 外围热管理系统研究进展[J]. 城市燃气, 2019(3): 4-10.
YANG Boran, CHEN Zhiguang, QIN Chaokui. Progress of SOFC balance of plant(BOP)[J]. Urban Gas, 2019(3): 4-10(in Chinese).
- [24] AGUIAR P, ADJIMAN C S, BRANDON N P. Anode-supported intermediate-temperature direct internal

- reforming solid oxide fuel cell: II. Model-based dynamic performance and control[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 147(1-2): 136-147.
- [25] MEADOWCROFT A D, HOWROYD S, KENDALL K, et al. Testing micro-tubular SOFCs in unmanned air vehicles(UAVs)[J]. *ECS Transactions*, 2013, 57(1): 451-457.
- [26] TUCKER M C. Dynamic-temperature operation of metal-supported solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2018(395): 314-317.
- [27] BRODERICK J, HARTNER J, TILBURY D M, et al. Modeling and simulation of an unmanned ground vehicle power system[C]//Processing Volume 9084, Unmanned Systems Technology XVI. Baltimore, Maryland, United States: SPIE, 2014: 908406.
- [28] WANG Yuanzhan, SIEGEL J B, STEFANOPOULOU A G. Control strategies for power quantized solid oxide fuel cell hybrid powertrains: in mobile robot applications[J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2016, 5(1): 58-67.
- [29] 陈湮佳. 燃料电池复合能源系统及能量管理发展综述[J]. *机电一体化*, 2019, 25(Z1): 3-10, 28.
CHEN Yanjia. An overview on system topologies and energy management strategies of fuel cell hybrid vehicles[J]. *Mechatronics*, 2019, 25(Z1): 3-10, 28(in Chinese).
- [30] FLETCHER T P. Optimal energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle[D]. Leicestershire: Loughborough University, 2017.
- [31] BRADLEY T H. Modeling, design and energy management of fuel cell systems for aircraft[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [32] 宋春宁, 钟文瀚. 基于启发式动态规划的固体氧化物燃料电池优化控制研究[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(7): 1830-1833.
SONG Chunning, ZHONG Wenhan. Study on optimization control of solid oxide fuel cell via heuristic dynamic programming[J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(7): 1830-1833(in Chinese).
- [33] KEEGAN K R, WEISS A M, DEJOHN C R. Reformer start-up strategy for use in a solid oxide fuel cell control system: USA, 8277524[P]. 2012-10-02.
- [34] MUELLER F, BROUWER J, JABBARI F, et al. Dynamic simulation of an integrated solid oxide fuel cell system including current-based fuel flow control[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2006, 3(2): 144-154.
- [35] BAO Cheng, WANG Ying, FENG Daili, et al. Macroscopic modeling of solid oxide fuel cell(SOFC) and model-based control of SOFC and gas turbine hybrid system[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 66: 83-140. 2005, 147(1-2): 136-147.
- [36] ZHANG Lin, LI Xi, JIANG Jianhua, et al. Dynamic modeling and analysis of a 5-kW solid oxide fuel cell system from the perspectives of cooperative control of thermal safety and high efficiency[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(1): 456-476.
- [37] 高丹慧. 固体氧化物燃料电池系统优化控制[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
GAO Danhui. Optimal control of a solid oxide fuel cell system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018(in Chinese).
- [38] WONGWIWAT J, BHURIPANYO P, WELLES T S, et al. Thermally self-sustaining tubular SOFC power generator with no moving parts[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1407(1): 012007.
- [39] SHI Wangying, ZHU Jianzhong, HAN Minfang, et al. Operating limitation and degradation modeling of micro solid oxide fuel cell-combined heat and power system[J]. *Applied Energy*, 2019(252): 113444.
- [40] WANG Xiaorui, HUANG Biao, CHEN Tongwen. Data-driven predictive control for solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(2): 103-114.
- [41] 李勇汇, 王冰, 朱海昱. 固体氧化物燃料电池电厂并网最优效率负荷跟踪分层递阶控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(7): 1061-1071.
LI Yonghui, WANG Bing, ZHU Haiyu. Maximum efficiency load-tracking hierarchical control scheme for grid-connected solid oxide fuel cell power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(7): 1061-1071(in Chinese).
- [42] HUANG Biao, QI Yutong, MURSHED M. Solid oxide fuel cell: perspective of dynamic modeling and control[J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(10): 1426-1437.
- [43] BRAUN R J, VINCENT T L, ZHU Huayang, et al. Analysis, optimization, and control of solid-oxide fuel cell systems[J]. *Advances in Chemical Engineering*, 2012, 41: 383-446.
- [44] LAROSA L, TRAVERSO A, FERRARI M L, et al. Pressurized SOFC hybrid systems: control system study and experimental verification[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(3): 031602.
- [45] QIN Yuxiao, ZHAO Guodong, HUA Qingsong, et al. Multiobjective genetic algorithm-based optimization of PID controller parameters for fuel cell voltage and fuel utilization[J]. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3290.
- [46] CARRÉ M, BRANDENBURGER R, FRIEDE W, et al. Feed-forward control of a solid oxide fuel cell system with anode offgas recycle[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 282: 498-510.
- [47] OH S R, SUN Jing, DOBBS H, et al. Model predictive control for power and thermal management of an integrated solid oxide fuel cell and turbocharger system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*,

- 2014, 22(3): 911-920.
- [48] SANANDAJI B M, VINCENT T L, COLCLASURE A M, et al. Modeling and control of tubular solid-oxide fuel cell systems: II. Nonlinear model reduction and model predictive control[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 208-217.
- [49] WU Xiaojuan, GAO Danhui. Fault tolerance control of SOFC systems based on nonlinear model predictive control[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(4): 2288-2308.
- [50] RADUWAN N F, MUCHTAR A, SOMALU M R, et al. Challenges in fabricating solid oxide fuel cell stacks for portable applications: a short review[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2018, 10(5): 80-86.
- [51] DILLIG M. Thermal management of solid oxide cell systems with integrated planar heat pipes[D]. Nürnberg: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [52] 蔡于勋, 祝得治, 李想, 等. SOFC 热管理系统中的串级控制应用[J]. 化学工程与技术, 2011, 1(2): 22-28. CAI Yuxun, ZHU Dezhi, LI Xiang, et al. Application of cascade control in solid oxide fuel cell thermal management system[J]. Hans Journal of Chemical Engineering and Technology, 2011, 1(2): 22-28(in Chinese).
- [53] LUO Yun, JIANG Wenchun, ZHANG Qian, et al. Effects of anode porosity on thermal stress and failure probability of planar solid oxide fuel cell with bonded compliant seal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(18): 7464-7474.
- [54] 郭为民, 刘江. 使用丙烷燃料的便携式固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(11): 1511-1517. GUO Weimin, LIU Jiang. Advance in portable solid oxide fuel cells operating on propane[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(11): 1511-1517(in Chinese).
- [55] 王天宏, 李奇, 尹良震, 等. 燃料电池系统在线辨识和实时最大效率滑模控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5118-5128. WANG Tianhong, LI Qi, YIN Liangzhen, et al. Fuel cell system online identification and real-time maximum efficiency sliding mode control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5118-5128(in Chinese).
- [56] XU Haoran, MA Jingbo, TAN Peng, et al. Towards online optimisation of solid oxide fuel cell performance: combining deep learning with multi-physics simulation[J]. Energy and AI, 2020, 1: 100003.
- [57] YUAN Ping, LIU S F. Transient analysis of a solid oxide fuel cell unit with reforming and water-shift reaction and the building of neural network model for rapid prediction in electrical and thermal performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(1): 924-936.
- [58] 战俊豪, 戴海峰, 袁浩, 等. 基于 PID 神经网络的燃料电池过氧比控制[J]. 机电一体化, 2020, 26(3): 3-10. ZHAN Junhao, DAI Haifeng, YUAN Hao, et al. Design of oxygen excess ratio control for fuel cell system with PID neural network[J]. Mechatronics, 2020, 26(3): 3-10(in Chinese).
- [59] CHETTIBI N, MELLIT A. Intelligent control strategy for a grid connected PV/SOFC/BESS energy generation system[J]. Energy, 2018, 147: 239-262.
- [60] 李泽华. 固体氧化物燃料电池/锂电池混合动力系统的电能优化管控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. LI Zehua. Research on power optimal management and control of solid oxide fuel cell/lithium battery hybrid system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [61] 苏波, 李奇, 王天宏, 等. 城轨交通用燃料电池/超级电容混合动力系统瞬时等效最小氢耗硬件在环方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5714-5723. SU Bo, LI Qi, WANG Tianhong, et al. Research on Hardware-in-the-loop methods for instantaneous equivalent minimum hydrogen consumption of fuel cell/ultracapacitor hybrid systems for urban rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5714-5723(in Chinese).



王雨晴

在线出版日期: 2021-03-25.

收稿日期: 2020-10-30.

作者简介:

王雨晴(1990), 女, 特别副研究员, 主要从事燃料电池及分布式供能系统的研究工作, wangyq@bit.edu.cn;

童欣(1997), 女, 硕士研究生, 主要从事燃料电池系统及其控制方法的研究工作, 3120190229@bit.edu.cn.

(编辑 胡琳琳)

Research Status and Advances in Control of Portable Solid Oxide Fuel Cell Systems

WANG Yuqing¹, TONG Xin¹, YUAN Lei²

(1. Beijing Institute of Technology; 2. Beijing Special Vehicle Research Institute)

KEY WORDS: solid oxide fuel cell, portable system, dynamic characteristic, control strategy, control algorithm

Solid oxide fuel cell (SOFC) is a clean energy conversion technology which features in high energy density and high efficiency. These features make SOFC a potential candidate in mobile and portable power applications, such as remote power, auxiliary power, individual power, and etc. A portable SOFC system is a typical multi-input multi-output (MIMO) system with strong non-linearity. Thus, a reliable control system is required to ensure the safety and high-performance operation of the portable SOFC system. Research on system control strategies will promote the realization and application of portable SOFC systems. In this paper, the research status and advances in control of portable SOFC systems are thoroughly reviewed.

A portable SOFC system consists of a gas supply sub-system, SOFCs, a tail gas combustion sub-system, a heat recovery sub-system and a power regulation sub-system, as shown in Fig. 1. The SOFC is the core of the whole system in which the chemical energy of the fuel is converted to electricity through electrochemical reactions.

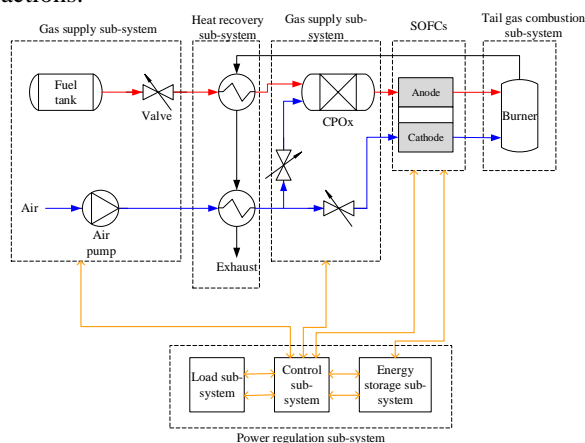


Fig. 1 Schematic of a portable SOFC system

Compared to the stationary system, the portable SOFC system will endure start-up-shut-down cycles and dynamic load changes more frequently. The dynamic characteristics of the SOFC on single cell level, stack level and system level are the basis of the development of control strategies. The research on the dynamic characteristics of a single SOFC shows that the electrical

dynamic response is fast with a time constant of micro seconds while the thermal dynamic response is slow with a time constant of hundred seconds.

The control objectives of a portable SOFC system include the temperature control, the rapid load following, the power distribution and the restriction of carbon deposition, etc. Accordingly, several control strategies are proposed to achieve the control objectives. The thermal management strategy, power management strategy and material management strategy are reviewed in this paper. The thermal management strategy should deal with the heat transfer and distribution within the SOFC and other balance of plant (BOP) components. Adjusting the air flow rate to change the heat convection between the SOFC and the air is a typical strategy to control the SOFC temperature. Both the load following and the power distribution are power management strategies. For a portable SOFC system, a typical load following strategy is to determine whether the current load is lower than the average load within a period. If the current load is lower, then the electricity produced by the SOFC will be used. Otherwise, the electricity stored in the system will be used. For the power distribution strategy, both rule-based and optimization-based power management strategies are reviewed. The material management strategy is a supplement to the above two strategies, such as the control of C/O ratio of the reformer, the current-based fuel control of the SOFC fuel utilization, etc. The realization of the control strategies relies on the controllers and control algorithms. The proportion integration differentiation (PID) is suitable for single-variable problems. Furthermore, several advanced control algorithms such as model predictive control (MPC), nonlinear model predictive control (NMPC) and adaptive control are used in SOFC systems.

Current researches on neural network and machine learning will promote the development of the control of portable SOFC systems. The hardware-in-the-loop simulation will also play an important role in the practical application and commercialization of the portable SOFC systems.