

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230531

## 混合能源直流微电网能源优化管控策略研究

张琳<sup>1</sup>, 谢洪途<sup>2</sup>, 赵路路<sup>3</sup>, 陈勇<sup>4</sup>, 王一舟<sup>4</sup>, 李世飞<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院预警技术系, 湖北 武汉 430019; 2. 中山大学·深圳电子与通信工程学院, 广东 深圳 518107;  
3. 中国人民解放军 95369 部队, 广东 佛山 528000; 4. 中国人民解放军 95894 部队, 北京 102211)

**摘要:** 混合能源直流微电网在快速跟踪负载方面具有较大优势, 弥补了固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)直流微电网功率跟踪缓慢的问题。现有能源管控策略重点关注能源分配, 对系统效率、运行安全性和燃料亏空方面缺乏相关研究和成熟策略。为此, 提出了一种混合能源直流微电网能源优化管控策略。首先, 搭建了混合 SOFC 直流微电网模型。其次, 采用最优操作点(optimal operating points, OOPs)实现最大效率, 然后采用平均电流控制模式保证稳定的电力供应。最后, 设计了基于 SOFC 电流的时滞控制算法来避免燃料亏空。实验结果表明, 所提出的能源优化管控策略具有时间响应迅速、输出效率高和热特性良好等优势。

**关键词:** 混合能源直流微电网; 能源优化管控; 最优操作点; 最大效率; 稳态热安全; 时滞控制; 避免燃料亏空

### Energy optimization and control strategy for a hybrid energy DC microgrid

ZHANG Lin<sup>1</sup>, XIE Hongtu<sup>2</sup>, ZHAO Lulu<sup>3</sup>, CHEN Yong<sup>4</sup>, WANG Yizhou<sup>4</sup>, LI Shifei<sup>1</sup>

(1. Department of Early Warning Technology, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. School of Electronics and Communication Engineering, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;  
3. Unit 95369, the PLA, Foshan 528000, China; 4. Unit 95894, the PLA, Beijing 102211, China)

**Abstract:** A hybrid energy DC microgrid has the great advantage of fast load tracking, which makes up for the slow power tracking problem of the solid oxide fuel cell (SOFC) DC microgrid. The existing energy management and control strategies focus on energy allocation but lack the relevant research and mature strategies in terms of system efficiency, operational safety, and fuel starvation. Therefore, an energy optimization and control strategy for hybrid energy DC microgrid is proposed. First, a hybrid SOFC DC microgrid model is constructed. Then, optimal operating points (OOPs) are used to achieve maximum efficiency. An average current control mode is adopted to ensure a stable power supply. Finally, a time-delay control algorithm based on the SOFC current is designed to avoid fuel starvation. The experimental results indicate that the proposed energy optimization and control strategy has advantages such as fast response, high output efficiency, and good thermal characteristics.

This work is supported by the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (No. 2023A1515011588 and No. 2021A1515010768).

**Key words:** hybrid energy DC microgrid; energy optimization and control; optimal operating points (OOPs); maximum efficiency; steady state thermal safety; time delay control; avoiding fuel starvation

## 0 引言

直流(direct-current, DC)微电网具有高效可靠、质量高、损耗少、交互能量高以及能消除频率和相位

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目资助(2023A1515011588, 2021A1515010768); 深圳市科技计划项目资助(202206193000001, 20220815171723002); 国家自然科学基金项目资助(62203465, 62001523, 62201614 和 6210593)

控制等优点, 在智能电网发展中发挥重要作用<sup>[1-3]</sup>。近年来, 各国尝试开发不同的分布式电源, 以解决日益增长的电力需求<sup>[4]</sup>。目前, 市场上的发电系统主要包括燃料电池、锂离子、硫钠、超级电容器、超导磁体、风能和太阳能光伏发电等<sup>[5-8]</sup>。其中, 固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是最有效的燃料系统之一。与传统能源生产方式相比, 它可以直接通过电化学反应产生电能, 污染扩散小<sup>[9-10]</sup>。然而, 近年来基于 SOFC 的直流微电网发

电也面临着一些挑战，主要表现在：

1) 热安全性能差。SOFC 电化学反应一般应维持在中高温(700~900 ℃)环境下进行,但是过高的温度和温度梯度会引起热应力的变化,最终将导致燃料电池失效。

2) 最优系统效率。为进一步提高系统输出效率,SOFC 系统需进行参数分析和多目标优化。

3) 快速外部负载跟踪。由于 SOFC 系统瞬时特性差,快速负载跟踪也是基于 SOFC 混合直流微电网能量管理的重要任务。

4) 燃料亏空。SOFC 电堆内的电化学反应时间为毫秒级,而燃料和空气的供应为秒级,时间差异将会导致燃料电池的亏空,从而导致电池的微观结构发生改变,进而对电池造成不可逆的损伤。

为解决热安全问题,研究人员在 SOFC 系统中提供多余空气以冷却 SOFC 电堆的温度<sup>[11-13]</sup>。研究人员还探索了最优操作点和最优功率切换策略,以提高系统效率<sup>[14-17]</sup>。针对高效率输出问题,文献[15]提出一种新型的冷、热、电联供系统,电效率达到 52%,总效率达到 75%。然而,只有少数学者在保证热安全的同时对效率优化相关问题进行了研究。

目前,研究人员提出了多种控制方法以保持快速的负载跟踪。针对固体氧化物燃料电池-燃气轮机(SOFC-gas turbine, SOFC-GT)的自主电力系统,文献[18]以牺牲系统效率为代价,提出一种总系统的控制结构。文献[19]提出一种将多控制回路与协调保护回路相结合的新型控制方法,实现了 SOFC 系统的快速负载跟踪和安全暂态运行。然而,在保证最优工作下热安全运行、高效率与快速跟踪负载,都是直流微电网需要进一步讨论和解决的问题。

针对燃料亏空问题,文献[20]使用不同方法来预测燃料亏空的发生概率和确定燃料亏空的程度。文献[21]研究了阳极支撑 SOFC 在燃料亏空条件下阳极微观结构形态的变化,表明燃料缺乏条件下可能会引起微观结构形态的显著变化。然而,在上述研究中没有讨论避免燃料短缺的控制策略。

基于 SOFC 的直流微电网采用混合能量结构,克服了 SOFC 独立发电系统的燃料亏空和动态响应慢的问题。文献[22]采用超级电容作为储能装置,瞬时提供较大的输出电流,可以有效防止外部负载突然增加时的燃料亏空。为降低 SOFC 的功率需求,文献[23-24]采用电池作为储能装置,其储能能量比超级电容器更高。为充分利用超级电容和电池的优点,文献[25]采用锂电池和超级电容作为储能装置。超级电容和锂电池分别承担负载电流的高频和低频分

量,然而此种结构会增加系统重量、体积和控制复杂性。因此,需要研究有效的能源管理策略,以便合理高效地利用系统中多种能源,其中涉及的燃料短缺、系统效率高、热安全问题应特别关注。

基于上述分析,假设外部负载功率增大情况下,本文设计了一种能源优化管控策略,能保证稳定快速的外部负载能源供应的同时,综合考虑燃料亏空、系统效率和热安全等问题。本文首先描述了基于 SOFC 的混合直流微电网的体系结构,包括 SOFC 独立发电系统、锂电池和超级电容器等。其次,分析和讨论其基本操作需求。然后提出了混合 SOFC 直流微电网的能量管理和优化策略。最后给出了实验结果与分析。

### 1 系统结构

#### 1.1 系统描述

图 1 为 SOFC 混合直流微电网系统的总体结构,主要由 SOFC 独立发电系统、锂电池、超级电容、DC/DC 变换器、直流微电网和直流负载等组成。

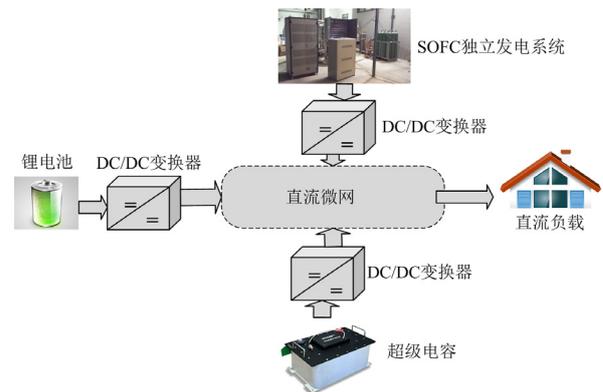


图 1 SOFC 混合直流微电网结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid SOFC-based DC microgrid

1) SOFC 独立发电系统。如图 2 所示,SOFC 独立发电系统主要由外围系统(balance of plant, BOP)和 SOFC 电堆等模块组成。SOFC 电堆是通过电化学反应向外负载提供电力。BOP 主要由氢气、空气供气管道和阀门、二次热交换器和尾气回收装置(燃烧器)等组成,主要作用是辅助 SOFC 电堆发电。本文中设定 SOFC 独立发电系统额定功率为 5 kW,电堆工作功率范围约为 1~6 kW。

2) 锂电池与超级电容单元。锂离子电池瞬时特性好,能够很好地弥补 SOFC 负载跟踪慢的问题。同时,超级电容器由于高电容特性,能够储存和释放更多的电能。由于 SOFC 系统能够独立实现外部

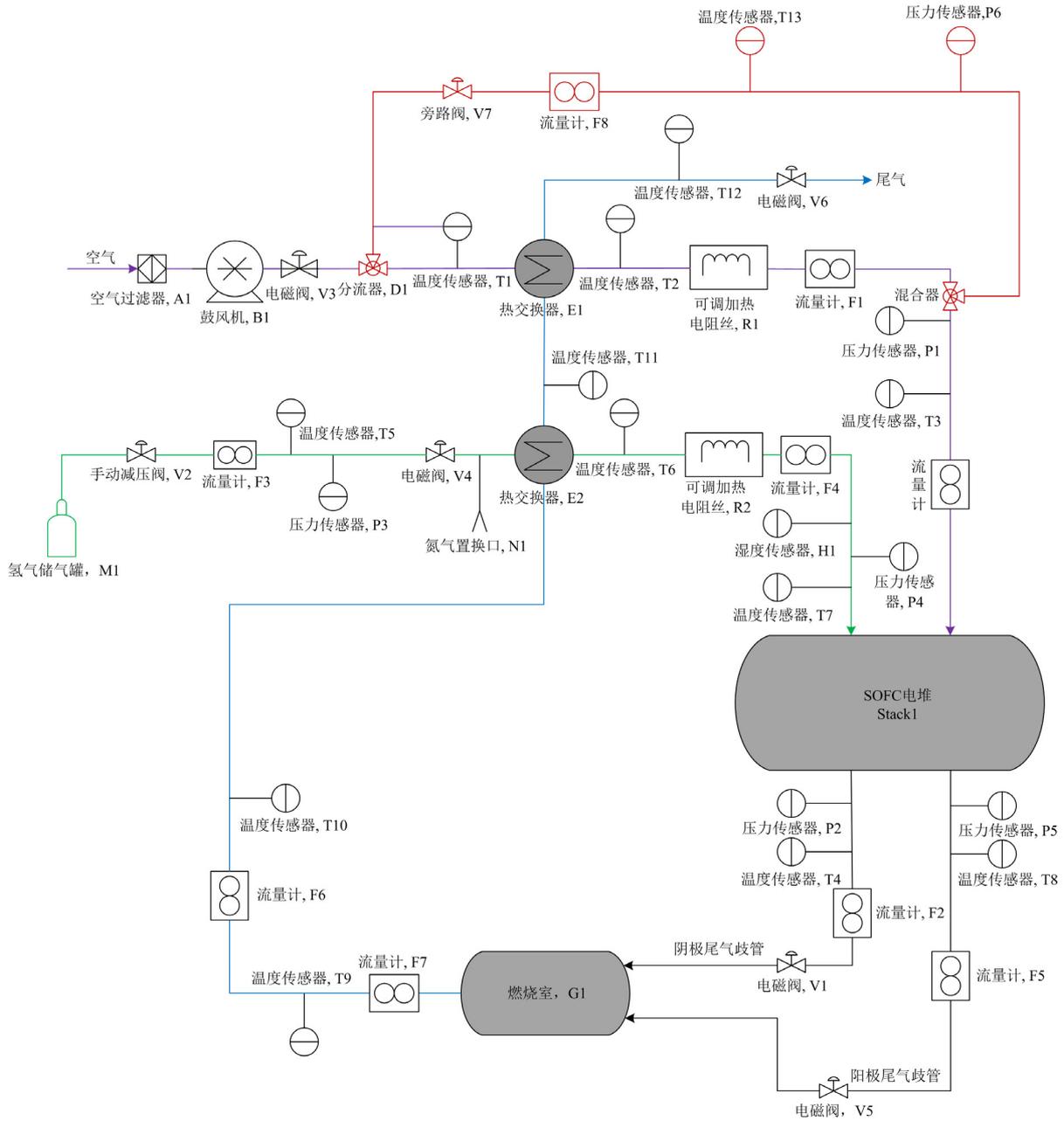


图2 SOFC 独立发电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the SOFC stand-alone power generation system

负载跟踪, 但是其瞬态特性差, 因此所需的瞬态电能可以由锂电池和超级电容提供给直流母线。

3) DC/DC 变换器。DC/DC 变换器用于满足直流微电网的稳定电能输出。由于 5 kW SOFC 系统的输出电压约为 80~120 V, 而国内电压一般大于 220 V, 因此本文使用 DC/DC Boost 变换器来满足外部负载要求。其中, DC/DC Boost 的输入电压为各个能量源的输出电压, DC/DC Boost 的输出电压为直流微电网外部负载需求电压。本文, 设定 DC/DC Boost

变换器开关频率为 5 kHz, 效率为 90%。

## 1.2 模型搭建

### 1) SOFC 独立发电系统模型搭建

前期工作中, 研究团队致力于 SOFC 独立发电系统模型的构建<sup>[26-28]</sup>。SOFC 系统每个单元模块的出口温度、摩尔分数和流体流速均可用能量守恒、质量守恒以及摩尔分数守恒来获得。SOFC 单电池片的电压, 可由能斯特电压减去极化损耗、欧姆损耗和浓度损耗的电压得到。其模型参数如表 1 所示。

表 1 SOFC 独立发电系统模型参数

Table 1 Model parameters of the SOFC stand-alone power generation system

| 电堆   |
|--|
| 电池片个数为 134, 电池宽度为 0.1 m, 电池长度为 0.1 m, 阴极流道厚度为 0.002 m, 阳极流道厚度为 0.001 m, PEN 厚度为 $5 \times 10^{-4}$ m, PEN 密度为 $5.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , PEN 热传导率为 $2 \times 10^{-3} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ , PEN 比热容为 $0.5 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , 连接体厚度为 $1 \times 10^{-3}$ m, 连接体密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 连接体热传导率为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ , 连接体比热容为 $0.62 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。   |
| 热交换器   |
| 长度为 0.96 m, 烟气管道半径为 0.1276 m, 烟气管道厚度为 $5 \times 10^{-4}$ m, 燃料管道半径为 0.0122 m, 燃料管道厚度为 $1 \times 10^{-3}$ m, 空气管道半径为 0.0958 m, 空气管道厚度为 $5 \times 10^{-4}$ m, 管壳密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 管壳比热容为 $0.62 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , 管壳热传导率为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ , 空气管道密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 空气管道比热容为 $0.62 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , 空气管道热传导率为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ , 燃料管道密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 燃料管道比热容为 $0.62 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , 燃料管道热传导率为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ 。 |
| 燃烧室  |
| 长度为 0.12 m, 直径为 0.15 m, 厚度为 $1.5 \times 10^{-3}$ m, 壁密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 壁比热容为 $0.62 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , 壁热传导率为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ kW/(m}\cdot\text{K)}$ 。  |

## 2) DC/DC Boost 变换器模型搭建

DC/DC Boost 变换器控制示意图如图 3 所示。DC/DC Boost 变换器采用平均电流控制方式, 以满足外部负载电压( $U_{DC}^*$ )的需求, 该方式由外电压环和内电流环组成。采用平均电流控制法设计反馈电路时, 将电流环视为电压环的一部分。电压回路的输出信号作为参考电流与电感电流的反馈信号进行比较。电感电流和电容电压都需要比例-积分-微分控制整定, 可快速达到外部负载所需直流电压。

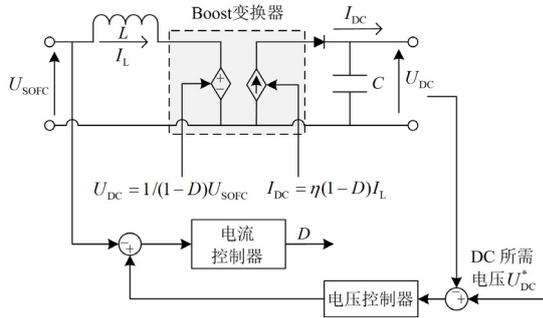


图 3 DC/DC Boost 变换器控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the DC/DC Boost converter control

DC/DC Boost 变换器的输入电压为 SOFC 电压  $U_{SOFC}$ , 直流电压  $U_{DC}$  与 SOFC 电压  $U_{SOFC}$  和占空比  $D$  有关, 可以表示为

$$U_{DC} = \frac{1}{1-D} U_{SOFC} \quad (1)$$

而 DC/DC Boost 变换器的输出电流  $I_{DC}$  与电感电流  $I_L$  和占空比有关,  $\eta$  为 DC/DC 变换器的效率, 则

$$I_{DC} = \eta(1-D)I_L \quad (2)$$

## 3) 锂电池模型搭建

考虑锂离子电池具有较高能量密度和供电效率, 因此首选其为 SOFC 直流微电网的辅助能源<sup>[29]</sup>。锂离子电池与燃料电池模型相似, 其模型参数可从

数据表或简单动态测试实验获取, 输出电压为

$$U_{ba} = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t - R_b \cdot i_t + A_b \exp(-B \cdot i_t) - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i^* \quad (3)$$

式中:  $i$  为锂电池模块电流;  $E_0$  为锂电池恒压;  $K$  为极化常数;  $Q$  为锂电池的额定容量;  $i^*$  为滤波后的电池电流;  $i_t$  为电池的实际电量;  $A_b$  为指数区振幅;  $B$  为指数区时间常数的倒数;  $R_b$  为电池内阻。

## 4) 超级电容模型搭建

超级电容器又被称为电双层电容器, 由于其高电容, 可以存储或释放更多的能量<sup>[30]</sup>。电双层电容器电池的电容可表示为

$$C = \left[ \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中,  $C_H$  和  $C_{GC}$  分别代表 Helmholtz 电容和 Gouy-Chapman 电容。考虑电阻损耗, 超级电容的输出电压  $U_{SC}$  为

$$U_{SC} = \frac{\int i_{SC} dt}{C_T} - R_{SC} \cdot i_{SC} \quad (5)$$

式中:  $R_{SC}$  为超级电容模块的电阻;  $i_{SC}$  为超级电容模块电流。而总电容  $C_T$  可以表示为

$$C_T = \frac{N_p \cdot C}{N_s} \quad (6)$$

式中,  $N_s$  和  $N_p$  分别表示串联或并联的电池数量。锂电池、超级电容与 DC/DC Boost 变换器模型搭建参数如表 2 所示。

## 2 系统特性分析

除了快速功率跟踪, 运行安全(包括热安全和避免燃料亏空)和高效输出是 SOFC 直流微电网需

表 2 锂电池、超级电容及 DC/DC Boost 变换器参数  
Table 2 Parameters of the lithium battery, super-capacitor  
and DC/DC Boost converter

|      | 参数                       | 数值                   |        |
|------|--------------------------|----------------------|--------|
| 锂电池  | 标准电压/V                   | 28                   |        |
|      | 额定容量/Ah                  | 6.6                  |        |
|      | 最大容量/Ah                  | 40                   |        |
|      | 充满电电压/V                  | 32.42                |        |
|      | 额定放电电流/A                 | 17.4                 |        |
|      | 内阻/ $\Omega$             | 0.012                |        |
|      | 容量 (Ah)@ 额定电压            | 36.17                |        |
|      | 初始电荷状态/%                 | 90                   |        |
|      | 电池电压响应时间/s               | 30                   |        |
|      |                          | 额定电容/F               | 15.6   |
| 超级电容 | 直流等效串联电阻/ $\Omega$       | $2.1 \times 10^{-3}$ |        |
|      | 额定电压/V                   | 16                   |        |
|      | 冲击电压/V                   | 18                   |        |
|      | 串联电容数量                   | 6                    |        |
|      | 并联电容数量                   | 1                    |        |
|      | 层数                       | 6                    |        |
|      | 分子半径/m                   | $\times 10^{-10}$    |        |
|      | 工作温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 25                   |        |
|      |                          | 电容 C/F               | 0.0029 |
|      | DC/DC Boost<br>变换器       | 效率/%                 | 90     |
|      | 满载电流/A                   | 22.7                 |        |
|      | 切换频率/kHz                 | 5                    |        |

要考虑的重要因素。本文主要讨论与热安全相关的热性能指标、与燃料亏空相关的燃料浓度指标及与系统效率相关的最优工况,对其相关特性进行分析。

### 1) 热安全指标

安全可控的温度是整个 SOFC 直流微电网稳定、长寿命运行的前提。SOFC 直流微电网中各个部件的温度需要在电堆或燃烧室材料的承受范围内,若 SOFC 电堆入口温差过大或温度梯度过大会导致产生较大的热应力,最终引起电堆变形甚至损坏。考虑以上因素,本文设置了 4 个热安全约束条件:即正极-电解质-负极(positive electrode-electrolyte-negative electrode, PEN)温度、最大 PEN 温度梯度、电堆入口气体温差和燃烧室温度,则约束条件为

- (1) 燃烧室温度  $T_B \leq 1273 \text{ K}$  ;
- (2) PEN 温度  $\text{Max}.T_{\text{PEN}} \in [873, 1173] \text{ K}$  ;
- (3) 最大 PEN 温度梯度  $\text{Max}.|\Delta T_{\text{PEN}}| \leq 8 \text{ Kcm}^{-1}$  ;
- (4) 电堆入口气体温差  $\Delta T_{\text{inlet}} \leq 200 \text{ K}$  。

### 2) 燃料浓度

若外部负载功率增大,确保充足的燃料供应是安全运行的重要条件之一。燃料亏空的主要是由燃料和空气供气管道中的传输延迟导致的。为了观测燃料亏空情况,必须观察电堆中燃料的浓度  $X_{\text{Fuel}}$ ,

使得  $X_{\text{Fuel}} > 0$ 。

### 3) 最优操作工况

为了进一步分析系统性能,考虑系统效率,本文选取系统进口空气流量、燃料流量、电流以及旁路阀开度作为组合调节变量。通过研究团队前期工作开展的横向优化过程<sup>[26-28]</sup>,可得到在静态条件下保证系统热安全、高效运行的最优操作曲线。

系统进口空气流量  $F_{\text{air}}$  为

$$F_{\text{air}} = 0.00937 + 0.08545P_{\text{SOFC}} + 0.0055P_{\text{SOFC}}^2 \quad (7)$$

系统进口氢气流量  $F_{\text{H}_2}$  为

$$F_{\text{H}_2} = 0.00326 + 0.00409P_{\text{SOFC}} + (9.57669e - 4)P_{\text{SOFC}}^2 \quad (8)$$

系统 SOFC 输出电流  $I_{\text{SOFC}}$  为

$$I_{\text{SOFC}} = 8.24308 + 1.78645P_{\text{SOFC}} + 0.02739P_{\text{SOFC}}^2 \quad (9)$$

系统旁路阀开度  $P_{\text{BP}}$  为

$$P_{\text{BP}} = \begin{cases} 0.2, & 1 \text{ kW} \leq P_{\text{Net}} < 1.5 \text{ kW} \\ -0.2P_{\text{Net}} + 0.5, & 1.5 \text{ kW} \leq P_{\text{Net}} < 2 \text{ kW} \\ -0.1P_{\text{Net}} + 0.3, & 2 \text{ kW} \leq P_{\text{Net}} < 3 \text{ kW} \\ 0, & 3 \text{ kW} \leq P_{\text{Net}} < 6 \text{ kW} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{SOFC}}$  为 SOFC 系统的实际输出功率;  $P_{\text{Net}}$  代表 SOFC 系统的净输出功率。

## 3 能量管理和优化策略

总体能量管理策略重点计算锂电池和超级电容所需的补充能量,如图 4 所示。

锂电池以及超级电容输出总能量需求  $P_{\text{ba+sc}}^*$  为

$$P_{\text{ba+sc}}^* = P_{\text{SOFC}}^* - P_{\text{SOFC}} \quad (11)$$

式中,  $P_{\text{SOFC}}^*$  为 SOFC 系统所需的输出净功率。锂电池输出电能的变化率  $R_{\text{ba}}$  为

$$R_{\text{ba}} = \frac{P_{\text{ba+sc}}^*(i) - P_{\text{ba}}^*(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \quad (12)$$

式中:  $t(i)$  为当前时间;  $t(i-1)$  为上一离散时间;  $P_{\text{ba}}^*$  为所需锂电池的功率。

设定上升沿压摆参数  $R$  和下降沿压摆参数  $F$ , 得到分段函数为

$$P_{\text{ba}}^*(i) = \begin{cases} \Delta t \cdot R + P_{\text{ba}}^*(i-1) & R_{\text{ba}} > R \\ \Delta t \cdot F + P_{\text{ba}}^*(i-1) & R_{\text{ba}} < F \\ P_{\text{ba}}^*(i) = P_{\text{ba+sc}}^*(i) & R \leq R_{\text{ba}} \leq F \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $P_{\text{ba}}^*(0) = P_{\text{ba+sc}}^*(0)$ 。则超级电容所需输出电能  $P_{\text{sc}}^*$  为

$$P_{\text{sc}}^* = P_{\text{ba+sc}}^* - P_{\text{ba}}^* \quad (14)$$

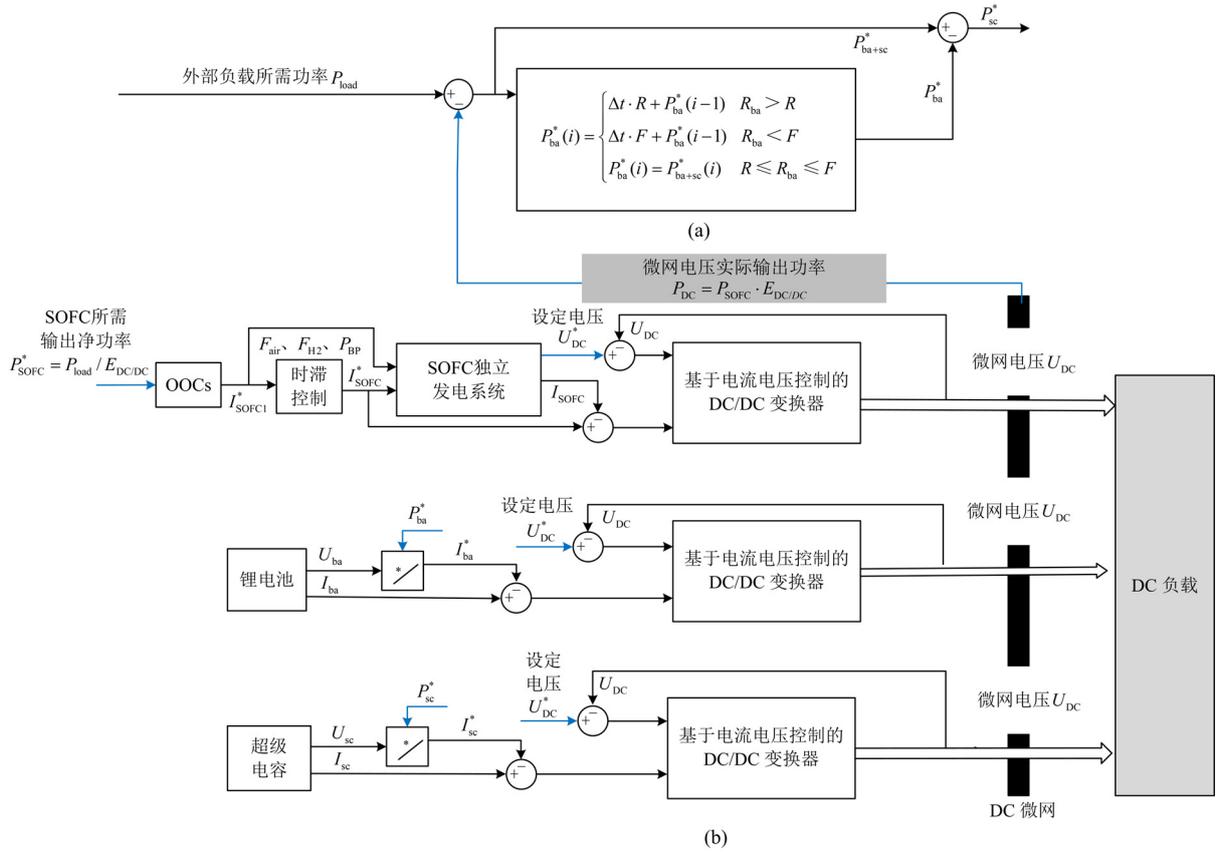


图 4 能量管理和优化策略示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy management and optimization strategy

3.1 SOFC 端能源优化管控策略

1) 假设外部负载所需功率为  $P_{DC}^*$ ，则 SOFC 所需的输出净功率为

$$P_{SOFC}^* = P_{DC}^* / E_{DC/DC} \quad (15)$$

式中， $E_{DC/DC}$  代表 DC/DC 升压变换器效率。

2) 基于 SOFC 所需输出净功率，通过最优操作曲线得相关调节参数  $I_{SOFC1}^*$ 、 $F_{air}$ 、 $F_{H2}$  和  $P_{BP}$ 。

3) 最优操作曲线得到的电流调节参数  $I_{SOFC1}^*$ ，可以通过时滞控制来避免燃料亏空。

$$I_{SOFC}^* = \frac{1}{\tau S + 1} I_{SOFC1}^* \quad (16)$$

式中： $\tau$  为时滞控制的延迟时间； $I_{SOFC1}^*$  为基于最优操作曲线得到的 SOFC 所需电流； $I_{SOFC}^*$  为时滞控制后的电流。

4) 时滞控制后的电流  $I_{SOFC}^*$  作为 SOFC 独立发电系统 DC/DC 变换器的参考电流，与 SOFC 系统实际输出电流进行比较，并通过电流电压调节器进行控制，该调节器采用 PID 控制器，控制 DC/DC 变换器输出电压达到直流微网所需的电压值  $U_{DC}^*$ 。

3.2 锂电池端能源优化管控策略

基于总体能量管理策略，计算得到锂电池所需的补充能量与锂电池输出电压，从而获得锂电池 DC/DC 变换器的参考电流，即

$$I_{ba}^* = P_{ba}^* / U_{ba} \quad (17)$$

基于式(17)得到锂电池 DC/DC 变换器的参考电流  $I_{ba}^*$ ，与锂电池实际输出电流  $I_{ba}$  进行比较，并通过电流电压调节器进行控制。电流电压调节器采用 PID 控制器，控制 DC/DC 变换器输出电压达到直流微电网所需电压值。

3.3 超级电容端能源优化管控策略

基于总体能量管理策略计算得到超级电容所需的补充能量与超级电容输出电压，从而获得超级电容 DC/DC 变换器的参考电流，即

$$I_{sc}^* = P_{sc}^* / U_{sc} \quad (18)$$

同样地，基于式(18)得到超级电容 DC/DC 变换器的参考电流  $I_{sc}^*$ ，与超级电容实际输出电流  $I_{sc}$  进行比较，并通过电流电压调节器进行控制。电流电压调节器采用 PID 控制器，控制 DC/DC 变换器输出电压达到直流微电网所需电压值。

## 4 实验结果与分析

除了保证 SOFC 直流微电网稳定电能供应外, 本文所提出的能源优化管控策略的目的是避免燃料亏空, 获得最大系统效率, 增强外部负荷跟踪能力。本节主要分析和讨论了上述相关的动态响应特性。假设时滞控制的延迟时间为  $\tau = 35 \text{ s}$ , 空气、氢气和旁路管道的延时时间为  $t_{d,MFC1} = t_{d,MFC2} = t_{d,MFC3} = 1 \text{ s}$ , DC 微电网电压需控制在  $220 \text{ V}$ , 外部负载所需功率从  $1 \text{ kW} \rightarrow 3 \text{ kW} \rightarrow 4.5 \text{ kW} \rightarrow 5.5 \text{ kW}$  进行变换。

### 4.1 快速负载跟踪特性分析

为了更好地观测 SOFC 直流微电网快速负载跟踪特性, 图 5 给出了负载跟踪特性响应曲线。从图 5(a) 可发现, DC 微电网实际输出功率能够快速跟踪

外部负载功率, 满足外部负载功率需求。图 5(b)~图 5(d) 分别观测了  $300 \text{ s}$ 、 $600 \text{ s}$  和  $900 \text{ s}$  功率切换时的负载跟踪特性瞬态特性图, 可发现 DC 微电网实际输出功率跟踪时间可达秒级。而 SOFC 独立发电系统跟踪外部负载功率所需时间一般为百秒级(如图 6(a)所示), 在 SOFC 作为跟踪外部负载功率增大的过程中, 锂电池与超级电容作为辅助电源, 其动态响应时间存在优势, 能够提供如图 6(b)~图 6(d) 所示的辅助电能, 以满足快速跟踪外部负载需求。因此, 从图 5 和图 6 可以发现, 本文所提的 SOFC 直流微电网结构能够很好地弥补 SOFC 系统动态响应慢的问题, 使得混合能源直流微电网系统能够瞬时跟踪外部负载。同时, 根据计算所需电能, 各个部件实际输出功率均显示出较高的准确性。

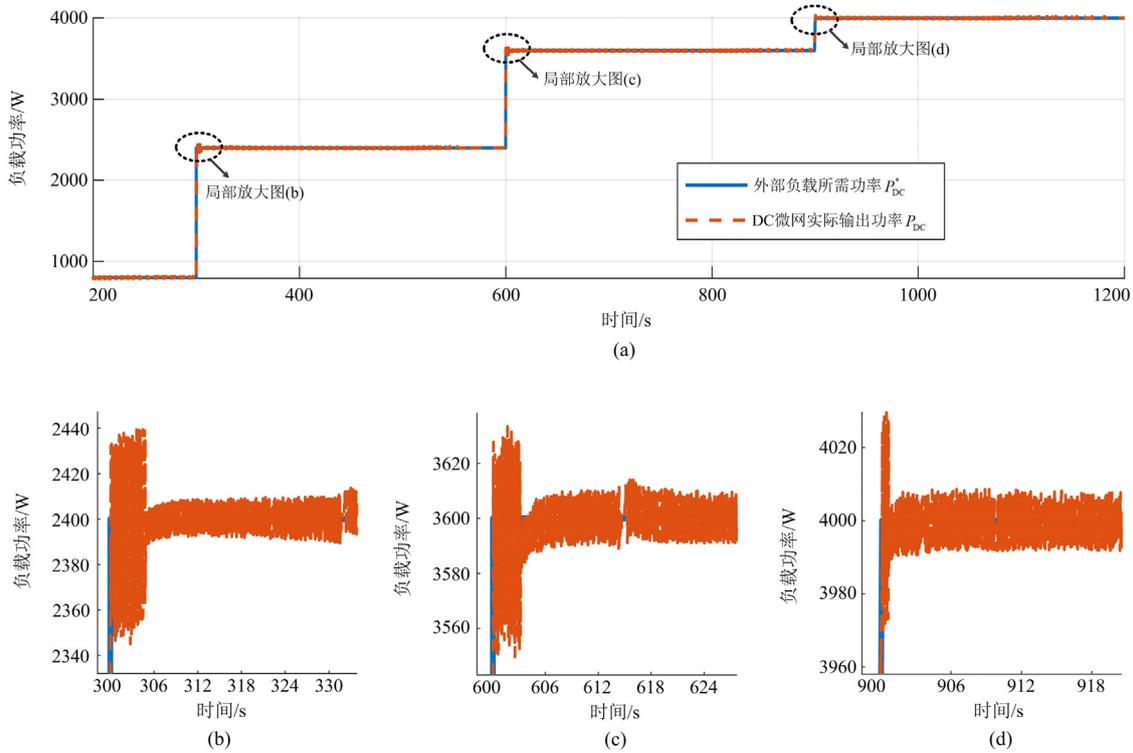
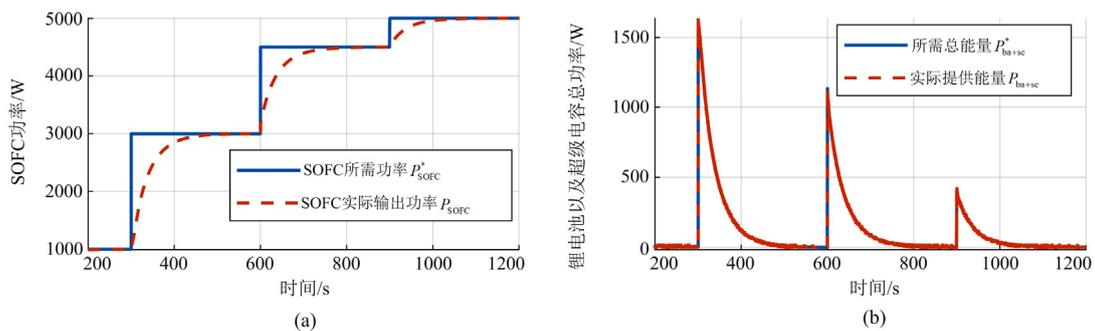


图 5 负载跟踪特性响应曲线

Fig. 5 Response curves of load tracing characteristic



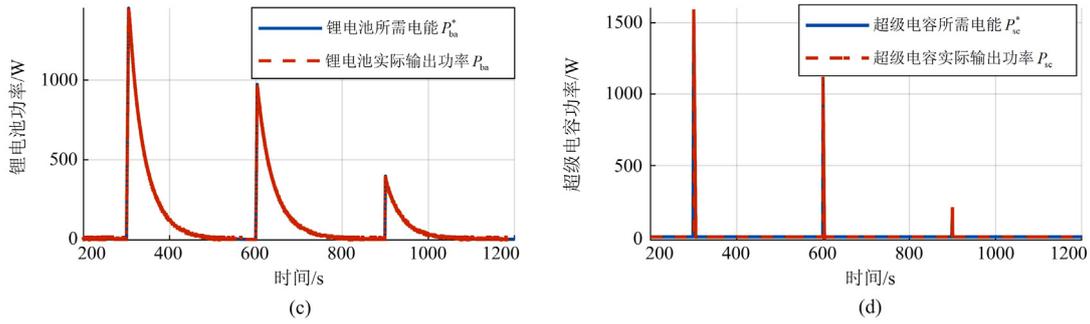


图 6 功率特性响应曲线

Fig. 6 Response curves of power characteristics

### 4.2 电特性与效率分析

图 7 展示了 SOFC 直流微电网各个部件的输出电特性, 包括电压、电流、荷电状态(state of charge, SOC)和系统输出效率。图 7(a)展示了锂电池的电特性, 其电压在 25~30 V 之间变化, 锂电池电流响应时间为百秒级, 在 SOFC 系统无法独立为外部负载供电时作为补充电源。锂电池 SOC 在 60%以上。图 7(b)展示了超级电容的电特性, 其电压在 7~15 V 之间变化, 电流瞬态增大, 以弥补 SOFC 系统动态

响应慢的问题。超级电容 SOC 在 60%以上。图 7(c)展示了 SOFC 系统的电特性, 其电压在 90~120 V 之间变化, 由于电化学反应特性, 电流响应时间为百秒级。考虑了最优工况, 其效率可达 42%以上。图 7(d)展示了 DC 微电网的电特性, 可发现基于本文所提的电流电压控制, DC 微电网电压能很好地稳定在 220 V, DC 微电网电流在 3~19 A 之间变化, 以满足外部负载需求。由于 DC/DC 变换器的能量损耗, DC 微电网整体效率稍低于 SOFC 系统效率。

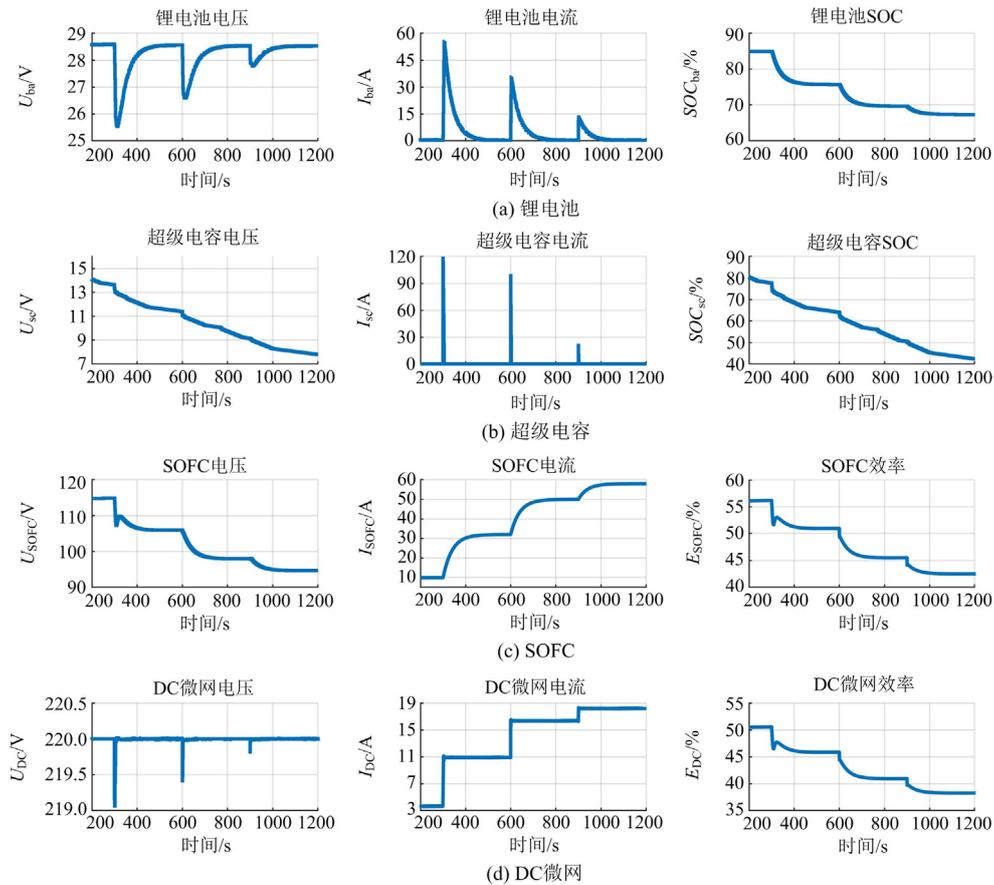


图 7 电特性与效率特性响应曲线

Fig. 7 Response curves of electrical and efficiency characteristics

### 4.3 热安全特性分析

图 8 为 SOFC 系统温度特性响应曲线, 包括最大 PEN 温度和温度梯度、燃烧室温度和电堆入口气体温差。由图 8 可发现, 在外部负载切换过程中, 最大 PEN 温度的范围约为 1020~1060 K, 满足温度约束需求  $\text{Max}.T_{\text{PEN}} \in [873, 1173] \text{ K}$ 。其次, 最大的 PEN 温度梯度小于  $2.5 \text{ Kcm}^{-1}$ , 同时满足约束要求  $\text{Max}|\Delta T_{\text{PEN}}| \leq 8 \text{ Kcm}^{-1}$ 。燃烧室温度小于 1160 K, 满足约束要求  $T_{\text{B}} \leq 1273 \text{ K}$ , 电堆入口气体温差在

140 K 以内, 满足约束要求  $\Delta T_{\text{inlet}} \leq 200 \text{ K}$ 。

### 4.4 燃料亏空分析

假设时滞控制的延迟时间分别为  $\tau = 25 \text{ s}$ 、 $\tau = 35 \text{ s}$ 、 $\tau = 55 \text{ s}$  和  $\tau = 75 \text{ s}$ , 实验分析了其燃料亏空特性。图 9 为电堆内的氢气摩尔浓度  $X_{\text{H}_2}$  的响应曲线, 结果表明电堆内剩余氢气随着时滞控制的延迟时间减小而减小, 特别地, 当  $\tau = 25 \text{ s}$  时出现燃料亏空。因此, 时滞控制的延迟时间需大于某一临界值, 从而以避免燃料亏空。

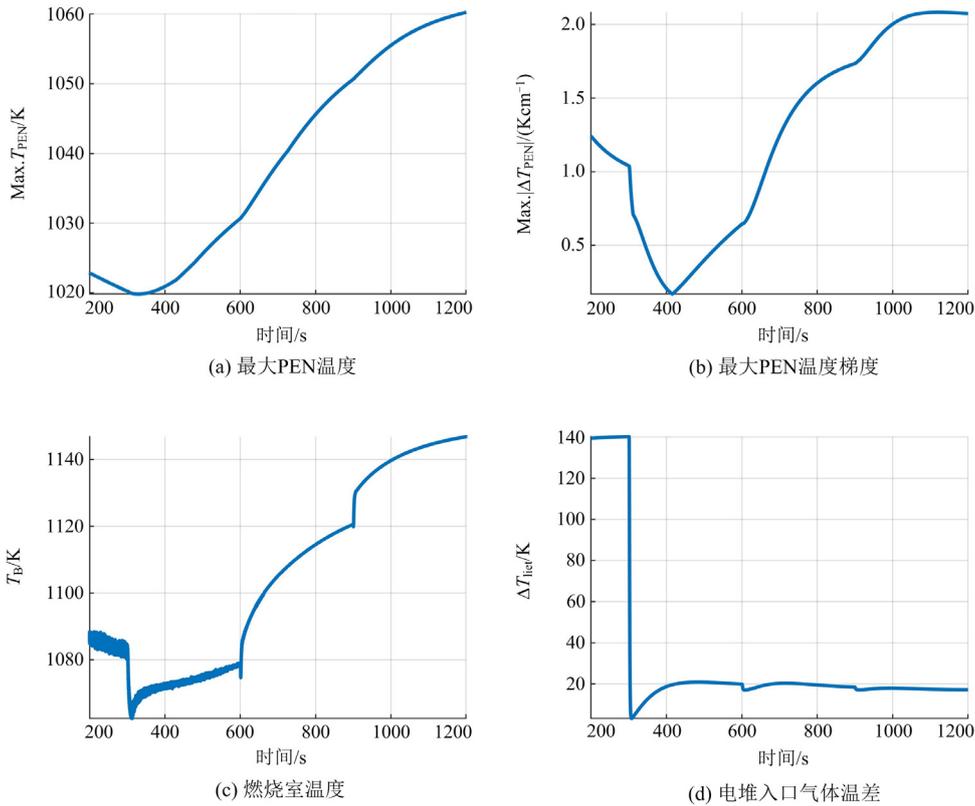


图 8 SOFC 温度特性响应曲线

Fig. 8 Response curves of the SOFC thermal characteristics

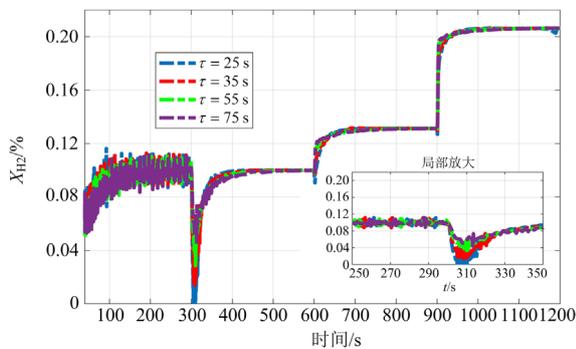


图 9 电堆内的氢气摩尔浓度响应曲线

Fig. 9 Response curves of hydrogen molar fraction in stack

## 5 结论

本文从高效率输出、避免燃料亏空、快速负载跟踪等方面提出了基于 SOFC 混合直流微电网的能量优化管控策略。首先, 建立了基于 SOFC 的混合直流微电网体系结构, 主要包括 SOFC、锂电池和超级电容器, 并搭建其模型。然后, 对系统基本运行需求进行了分析和讨论, 重点包括燃料亏空和系统最大效率。由于电池和超级电容可以弥补 SOFC 功率瞬变慢的缺陷, 在几秒钟内就可以实现良好的功率响应时间。综上所述, 本文的主要贡献如下:

1) 除了快速负载跟踪外, 提出的能量管理策略考虑

了燃料亏空、高效和输出稳定性,进一步提高了SOFC系统的性能;2)将OOPs应用于能量管理策略中,当所提出的SOFC系统达到稳态时,将获得最大的输出效率。

此外,基于SOFC的混合直流微电网在快速负载跟踪方面,特别是在外部功率上升时具有很大优势。但是,本文只讨论了功率负载上升时的系统特性,基于功率负载上升、下降时能源充放电的多目标优化的能量管理策略,是下一步的研究工作。

### 参考文献

- [1] 刘自发, 刘炎. 基于虚拟直流机的直流微电网电压稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 62-71.  
LIU Zifa, LIU Yan. Voltage stability control strategy of a DC microgrid based on a virtual DC machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 62-71.
- [2] 米阳, 王晓敏, 钱翌明, 等. 考虑通信时延的直流微电网分布式储能单元协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 91-100.  
MI Yang, WANG Xiaomin, QIAN Yuming, et al. Coordinated control method of distributed energy storage units in a DC microgrid considering communication delay[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 91-100.
- [3] 马海宁, 王鲁杨, 仇成, 等. 直流微电网不同荷电状态多储能系统分布式控制[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 87-95.  
MA Haining, WANG Luyang, QIU Cheng, et al. Research on distributed control of multiple energy storage systems with different SOC in DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 87-95.
- [4] 金国彬, 谢飞, 李国庆, 等. 弱电网且谐波畸变背景下分布式电源并网系统谐振抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 1-10.  
JIN Guobin, XIE Fei, LI Guoqing, et al. Resonance suppression of a distributed power grid-connected system in a weak grid and with harmonic distortion background[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 1-10.
- [5] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.  
XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [6] 希望·阿不都瓦依提, 吕海鹏, 晁勤. 基于非合作博弈的风-光-氢微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 110-118.  
XIWANG·Abuduwayiti, LYU Haipeng, CHAO Qin. Optimal capacity configuration of wind-photovoltaic-hydrogen microgrid based on non-cooperative game theory[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 110-118.
- [7] 王庆, 李玉琛, 蒙飞, 等. 混沌正弦算法在含风能电力系统经济排放调度中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 172-177.  
WANG Qing, LI Yuchen, MENG Fei, et al. Application of an improved chaotic sine cosine algorithm in the economic emission scheduling of a power system with wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 172-177.
- [8] 蔡涛, 张钊诚, 袁奥特, 等. 锂离子电池储能安全管理中的机器学习方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 178-187.  
CAI Tao, ZHANG Zhaocheng, YUAN Aote, et al. Review of machine learning for safety management of li-ion battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 178-187.
- [9] CAMBLONG H, BAUDOIN S, VECHIU I, et al. Design of a SOFC/GT/SCs hybrid power system to supply a rural isolated microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 12-20.
- [10] 魏立明, 吕雪莹. 固体氧化物燃料电池发电系统模型建立及逆变器仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 37-43.  
WEI Liming, LÜ Xueying. Solid oxide fuel cell power generation system model and study on inverter simulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 37-43.
- [11] SORRENTINO M, PIANESE C, GUEZENNEC Y G. A hierarchical modeling approach to the simulation and control of planar solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(1): 380-392.
- [12] HUO Haibo, WU Yangxiang, LIU Yuqiang, et al. Control-oriented nonlinear modeling and temperature control for solid oxide fuel cell [J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010, 7(4): 51-59.
- [13] HAJIMOLANA S A, TONEKABONIMOFGHADAM S M, HUSSAIN M A, et al. Thermal stress management of a solid oxide fuel cell using neural network predictive control[J]. Energy, 2013, 62: 320-329.
- [14] HUANG Shanglong, YANG Chen, CHEN Hao, et al. Coupling impacts of SOFC operating temperature and fuel utilization on system net efficiency in natural gas hybrid SOFC/GT system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 31.
- [15] ZHU Pengfei, WU Zhen, GUO Leilei, et al. Achieving

- high-efficiency conversion and poly-generation of cooling, heating, and power based on biomass-fueled SOFC hybrid system: Performance assessment and multi-objective optimization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 240.
- [16] ZHU Pengfei, YAO Jing, QIAN Chenhui, et al. High-efficiency conversion of natural gas fuel to power by an integrated system of SOFC, HCCI engine, and waste heat recovery: thermodynamic and thermo-economic analyses[J]. *Fuel*, 2020, 275.
- [17] TAN Luzhi, DONG Xiaoming, GONG Zhiqiang, et al. Analysis on energy efficiency and CO<sub>2</sub> emission reduction of an SOFC-based energy system served public buildings with large interior zones[J]. *Energy*, 2018, 165: 1106-1118.
- [18] KANDEPU A, IMSLAND L, FOSS B A, et al. Modeling and control of a SOFC-GT-based autonomous power system[J]. *Energy*, 2007, 32(4): 406-417.
- [19] WANG Xusheng, LÜ Xiaojing, MI Xicong, et al. Coordinated control approach for load following operation of SOFC-GT hybrid system[J]. *Energy*, 2022, 248.
- [20] GHORBANI B, VIJAYARAGHAVAN K. Developing a virtual hydrogen sensor for detecting fuel starvation in solid oxide fuel cells using different machine learning algorithms[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(51): 27730-27744.
- [21] BRUS G, MIYOSHI K, IWAI H, et al. Change of an anode's microstructure morphology during the fuel starvation of an anode-supported solid oxide fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(21): 6927-6934.
- [22] SHARMA H, JAGA O P. Modeling and control strategies for energy management system in electric vehicles[J]. *Journal of Perspectives in Science*, 2016, 8: 358-360.
- [23] EI FADIL H, GIRI F, GUERRERO J M, et al. Modeling and nonlinear control of a fuel cell/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(7): 3011-3018.
- [24] HAN Jiang, CHARPENTIER J F, TANG Tianhao. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat[J]. *Journal of Energies*, 2014, 7: 2799-2820.
- [25] ZHANG Wenbin, LI Jianqiu, XU Liangfei, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption Minimization strategy[J]. *Journal of Energy Conversion and Management*, 2016, 11: 59-69.
- [26] 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: 456-476.
- [27] ZHANG Lin, SHI Shaoying, JIANG Jianhua, et al. An optimization and fast load-oriented control for current-based solid oxide fuel cell system[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2018, 22: 2863-2877.
- [28] ZHANG Lin, SHI Shaoying, JIANG Jianhua, et al. Current-based MPC for operating-safety analysis of a reduced-order solid oxide fuel cell system[J]. *Ionics*, 2019, 25: 1759-1772.
- [29] TREMBLAY O, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C] // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, September 9-12, 2007, Arlington, TX, USA: 284-289.
- [30] AHMED O A, BLEIJS J A M. Power flow control methods for an ultra capacitor bidirectional converter in DC microgrids-a comparative study[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 727-738.

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-08-08

作者简介:

张琳(1988—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为自动化控制、能源优化管控; E-mail: 759758922@qq.com

谢洪途(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、先进智能感知与信息处理;

E-mail: xiehongtu@mail.sysu.edu.cn

赵路路(1984—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为图像判读与处理、信号分析与处理等。E-mail: 270498854@qq.com

(编辑 魏小丽)