

文章编号: 1000-582X(2012)02-010-07

SOFC-PEM 联合发电系统的不确定性分析

杨 晨, 谭玲君

(重庆大学 动力工程学院 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 以固体氧化物燃料电池与质子交换燃料电池(SOFC-PEM)联合发电系统为研究对象, 以系统操作参数作为不确定参数, 采用基于拉丁超立方体抽样法的不确定分析方法, 即包括以适宜的概率分布函数来表述和量化不确定因素并将不确定性传播到确定性模型来建立输出结果的概率分布规律, 进而分析系统操作变量的不确定性对系统净电功率的影响。不同于传统的灵敏度分析方法, 考虑参数的概率结构, 评价多个参数的相对重要性。结果表明: 高 SOFC 电堆操作温度、低燃料流量和低 SOFC 燃料利用率有利于减少系统净电功率因不确定因素引起的偏差和波动, 但同时以减少系统净电功率为代价。不确定性分析可为在不确定条件下设计参数的优化提供依据。

关键词: SOFC-PEM 联合发电系统; 灵敏性分析; 不确定性分析

中图分类号: TM911

文献标志码: A

Uncertainty analysis for SOFC-PEM hybrid systems

YANG Chen, TAN Ling-jun

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This article takes SOFC-PEM hybrid systems as the research object and considers the operating parameters to be uncertainty. Uncertainty analysis method based on Latin hypercube sampling involves quantifying the uncertainty in the input parameters in the form of appropriate distribution functions, propagating the uncertainty through a deterministic model to construct the output variability distributions, and analyzing the effects of operational parameter uncertainty on system output. Furthermore, non-traditional sensitivity analysis approach is used to evaluate the relative importance of various parameters considering this distribution structure. Results show that higher operating temperature of SOFC stack, lower fuel rate and lower fuel utilization of SOFC stack can reduce the influence of uncertainty on system output at the expense of system output. Uncertainty analysis can provide more credible basis for the optimization of design parameters under uncertainty.

Key words: SOFC-PEM hybrid systems; sensitivity analysis; uncertainty analysis

先进能源利用系统由于存在技术和经济上的不确定性因素, 在研究开发时往往缺乏可用的性能数据, 这些因素会引起系统研发前景的不确定性, 甚至导致灾难性后果。所以, 不确定性因素必须在设计

研究阶段就要予以高度重视。由于传统的确定性设计方法无法定量考虑不确定性因素的影响, 因此所设计的系统要么由于对系统参数不确定性过于敏感而不能稳定地发挥其效能, 要么由于采取过于保守

收稿日期: 2011-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876117); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11141149)

作者简介: 杨晨(1963-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事能源系统优化方向研究,

(Tel)023-65102513; (E-mail)yxytc@cqu.edu.cn。

的措施而丧失了经济性^[1]。因此,开展不确定性分析研究,既考虑系统在设计和使用过程中可能发生各种参数变差,通过参数设计,使系统性能达到最优点的同时又能对不确定性因素的波动不敏感,保证系统具有良好的可靠性和稳定性^[2],对于先进能源系统的研发具有重要的理论意义和应用价值。

不确定性分析方法的基本问题是已知不确定参数的概率密度函数,或者均值与方差,如何求出因变量的概率密度函数或者相应均值与方差^[2]。对于复杂的能源系统来说,其数学模型是非线性程度较高的多元函数,要得到它们的解析解是非常复杂和困难的,所以寻求计算效率和精度都较高的计算方法是急待解决的问题。Hisken^[3]等研究基于响应灵敏度分析(RSA)方法用于 IEEE39 公交电力系统的动态模拟,该研究用一阶泰勒级数展开替代原模型,由于替代模型预测原现实模型参数特征的信息有限,因而必然要额外造成模型参数不确定性,而且这种近似替代的方法不宜使用于不确定因素的离差系数大于 0.02 的场合。Gamou, S^[4]等采用快速概率整合方法(FPI)用于 1 MW 的磷酸燃料电池系统的负荷和成本的优化,他们将用户平均功率需求的 20% 的不确定性分配到所有输入变量中,然而由于 FPI 需要通过优化过程来计算概率信息(系统输出的均值与方差),而对动态系统分析有一定的局限性。Subramanyan 和 Diweka^[5-6]、Diwekar 和 Rubin^[7]分别把蒙特卡洛抽样模拟(MCS)与序列二次规划方法相结合用于 560 MW 的 SOFC/GT 系统和整体煤汽化联合循环发电系统 IGCC 优化设计中,并考虑模型参数、几何尺寸以及材料性能的变差影响。然而这种基于抽样方法的抽样统计法属于不确定性分析方法的经典方法,它不限于变量的离差系数大小、分布形式和随机变量间的相关性的限制,在复杂的随机模型的分析计算中,是一种值得推荐的方法。但是 MCS 的计算效率很低,只针对一个预重整器的模拟分析需要 90 min 的时间运行 1 000 个抽样样本才能达到计算精度,同时占用至少 2 GB 的计算内存^[5-6]。为提高计算效率,减少模拟误差,McKay 等^[3]提出基于分层抽样的拉丁超立方抽样方法(Latin hypercube sampling, LHS)代替 MCS, Latin 抽样方法合并了随机抽样和分层抽样的优点,对样本数量的节省非常显著。目前已有基于 LHS 的不确定性方法用于能源的研究。如 A, Mawardi^[8]则采用该方法分析了各操作参数对质子交换膜燃料电池功率密度影响; Yunhua ZHU^[9]则应用在整体煤汽化联合循环发电系统 IGCC 性能和成本的不确定

性优化。

抽样统计法的基本步骤是将不确定因素的随机性用服从某种特定概率分布的随机变量来表示,通过随机抽样方法从概率分布函数中随机取样,将所有参数取样值的组合输入模型,执行模型模拟,最后对模型输出结果计算并分析统计特征(如均值、标准差和置信区间等)。文中采用基于 LHS 法的抽样统计法,研究操作参数的不确定性对 SOFC-PEM 联合发电系统的影响,通过调整操作参数均值以提高系统性能和其稳定性,为满足不同的设计准则所进行的设计优化提供参考。

1 不确定性分析方法

不确定性分析方法采用基于分层抽样方法-拉丁超立方体抽样方法(Latin hypercube sampling, LHS)的抽样统计法^[10-11],具体步骤如下^[10]。

1) 不确定参数的表征及量化。将不确定参数 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 作为随机变量且已知其概率密度函数 $p(x)$, 如正态分布, 对数正态分布, 三角分布等。

2) 从概率分布函数中随机抽样出样本并通过确定性模型传递。利用 LHS 方法对随机变量进行分层抽样, 每个子区间仅产生一个随机数, 然后采用 Box-Muller、Moro 等数学变换法, 将随机样本转换为具有概率分布的抽样点集, 并贯穿于确定性模型, 计算得到相应的模拟结果值 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 。

3) 画出 y 的直方图。将 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 等分为几个区间, 统计出 y 落入每个区间内的频率即可估计出 y 在每个子区间内事件的发生频率。

4) 估计 y 的统计值。 y 的均值和标准差分别为样本的均值和标准差。

$$\text{均值: } \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \approx \mu_y, \quad (1)$$

$$\text{标准差: } s_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \approx \sigma_y. \quad (2)$$

不确定性分析框架见图 1。

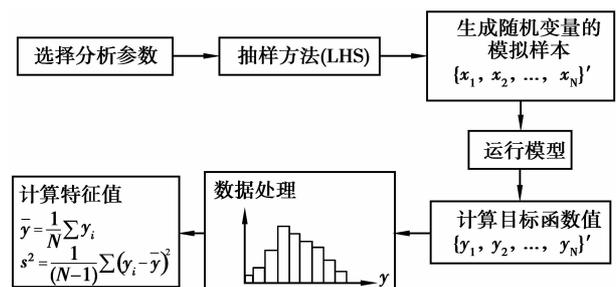


图 1 不确定性分析流程

2 SOFC-PEM 联合发电系统

2.1 系统描述

2000 年, Andrew Dicks^[12] 等人提出 SOFC-PEM 联合发电系统的概念。在该系统中, SOFC 不但产生电能, 而且依靠 SOFC 的内重整技术为

PEMFC 提供净化重整气, 节省了外置重整器。相比与 SOFC 发电系统和重整器-PEM 发电系统, SOFC-PEM 系统中燃料的化学能更为充分转化为电能, 从而具有更高的能量利用率^[12-17]。SOFC-PEM 联合发电系统流程见图 2。

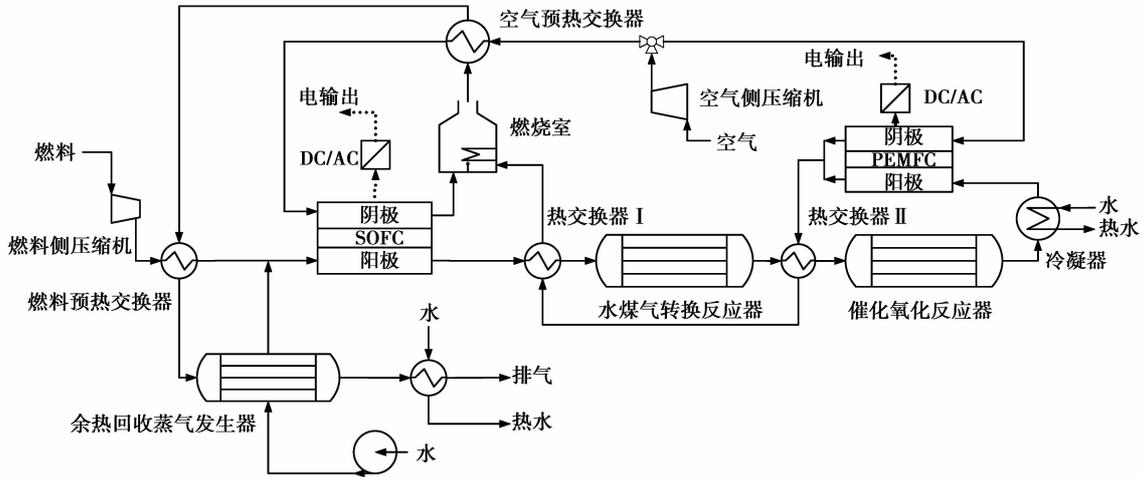


图 2 SOFC-PEM 联合发电系统示意图

2.2 系统模型的建立

耦合质量、能量平衡方程和电化学知识完成 SOFC 和 PEMFC 模型的建立。对于系统中的辅助设备, 采用基本的单节点稳态热力学模型, 建立质量和能量平衡方程, 完成 SOFC-PEM 联合发电系统模型的研究。系统模型求解流程图见图 3。

2.2.1 SOFC 模型

SOFC-PEM 联合发电系统是建立在管式内重整 SOFC (IRSOFC) 燃料电池基础上。SOFC 电化学反应均假定处于化学平衡状态, 可以应用平衡常数的定义和燃料利用率来计算它们的化学平衡常数。其计算式如下:

$$K_{p, \text{reformer}} = \frac{n_{\text{H}_2, \text{out}}^3 \times n_{\text{CO}, \text{out}}}{n_{\text{CH}_4, \text{out}} \times n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} \times n_{\text{tot}}^2} \left(\frac{p_{\text{tot}}}{p_0} \right)^2, \quad (3)$$

$$K_{p, \text{shift}} = \frac{n_{\text{H}_2, \text{out}} \times n_{\text{CO}_2, \text{out}}}{n_{\text{CO}, \text{out}} \times n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}}}, \quad (4)$$

$$U_f = \frac{r_{\text{H}_2}}{(3r_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2, \text{inlet}})}, \quad (5)$$

其中: n 为气体的摩尔流量; U_f 为燃料利用率; K_p 为反应平衡常数; P_{tot} 为反应气体的总压。

$K_{p, \text{reformer}}, K_{p, \text{shift}}$ 可由化学平衡常数与操作温度关系式计算得出^[13]

$$\log K_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E. \quad (6)$$

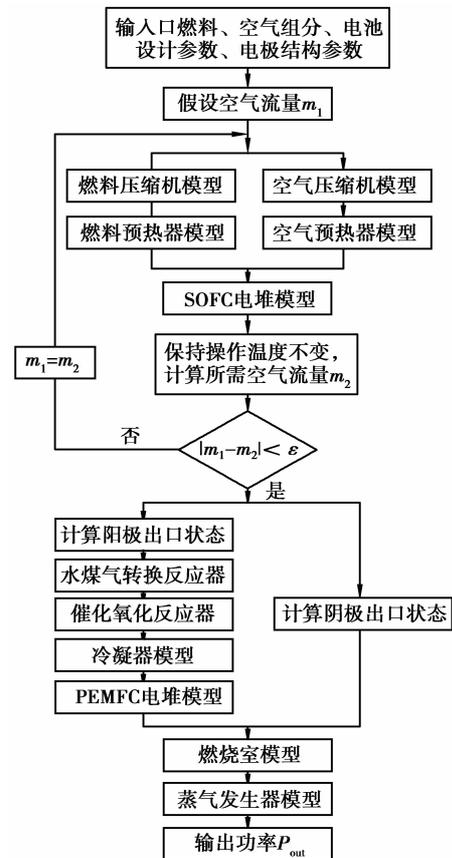


图 3 系统模型求解流程图

假设电池的操作温度,联立求解式(3)~(6)可得到 CH_4 、 CO 、 H_2 的反应速率,S. H. Chan^[18]等人在其典型的SOFC发电系统中已证明,重整后阳极甲烷的摩尔含量远低于1%,因此可以假设甲烷蒸汽重整反应完全。

化学平衡时各气体出口摩尔流速

$$n_{i,\text{out}} = n_{i,\text{in}} + \sum_k \nu_{i,k} r_k, \quad (7)$$

式中: $n_{i,\text{out}}$ 为组分*i*的出口摩尔流量; $n_{i,\text{in}}$ 为组分*i*的进口摩尔流量; $\nu_{i,k}$ 为组分*i*在化学反应*k*中的化学计量系数; r_k 为第*k*个反应的反应率。

SOFC电堆能量平衡方程

$$\sum_i Q_{i,\text{out}} = \sum_i Q_{i,\text{in}} + \sum_k r_k (-\Delta H_k) - W_{\text{cell}}, \quad (8)$$

式中: $Q_{i,\text{out}}$ 为组分*i*的出口的能量流量; $Q_{i,\text{in}}$ 为组分*i*的入口的能量流量; W_{cell} 为SOFC电堆发电功率; ΔH_k 为反应*k*的摩尔焓变; W_{cell} 为的发电功率。其中,反应*k*的摩尔焓变 ΔH_k 可由下式计算

$$\Delta H_k = \left[\sum_i \nu_{i,k} \left(h_{i,0} + \int_{298}^T C_{p,i} dT \right) \right]_{\text{out}} - \left[\sum_i \nu_{i,k} \left(h_{i,0} + \int_{298}^T C_{p,i} dT \right) \right]_{\text{in}}, \quad (9)$$

其中: $h_{i,0}$ 为组分*i*在标准状态下的摩尔焓变; $C_{p,i}$ 为组分*i*的比热容。

利用能量平衡方程,保持SOFC电堆操作温度不变,计算所需空气流量,循环计算式(3)~(9),直至2次计算的空气流量满足精度要求,完成SOFC电堆模型的求解。

SOFC电堆发电功率

$$P_{\text{SOFC}} = 2FV_{\text{SOFC}}(n_{\text{H}_2,\text{in}} - n_{\text{H}_2,\text{out}}), \quad (10)$$

其中 V_{SOFC} 为SOFC的电压,它由采用一维、单相流、等温电化学半经验数学模型计算得出,具体数学模型与数据参考文献[19]。

2.2.2 PEMFC模型

从SOFC出来的混合气体仍含有可利用的燃料(CO 、 H_2),它通过水煤气转换反应器和催化氧化反应器消除 CO ,形成富氢气体进入PEMFC阳极,与阴极的空气发生电化学反应,产生额外电能。PEMFC电堆发电功率

$$P_{\text{PEM}} = 2Fn_{\text{H}_2,\text{in}}V_{\text{PEM}}Uf_{\text{PEM}}, \quad (11)$$

其中, V_{PEM} 为PEMFC电堆的电压,PEMFC的电化学模型见文献[20-21]。

2.2.3 其他辅助设备模型

假设其他辅助设备都在各自设计工况下稳态工

作。空气侧和燃料侧压缩机模型采用通用的等熵效率模型。热交换器模型采用基于 ϵ -NTU方法的零维模型。假设在水煤气转换反应器内,99.9%的 CO 发生置换反应转变成 CO_2 ,在催化氧化反应器中剩余的 CO 将全部被氧化为 CO_2 ,且在催化氧化器中只发生 CO 的氧化反应。两者和燃烧室均采用质量平衡方程(7)和能量平衡方程(8)计算气体出口流量和温度。

忽略水泵耗电损失,则有系统净发电功率

$$P = P_{\text{SOFC}} + P_{\text{PEM}} - P_{\text{compressor}}. \quad (12)$$

3 SOFC-PEM联合发电系统的不确定性分析

以发电功率为150 kW的SOFC-PEM联合发电系统为模拟对象,选取SOFC电堆温度 T_{SOFC} 、SOFC电堆燃料利用率 Uf_{SOFC} 、甲烷流量 N_{CH_4} 、氢碳比STCR、系统操作压力 P_{system} 、PEMFC电堆燃料利用率 Uf_{PEM} 6个参数作为不确定参数,假设其概率分布为正态分布。定义参数离差系数COV,即标准差与均值之比。取各参数 COV_ξ 为0.1,取值范围和均值如表1所示。采用基于LHS的不确定性分析方法对系统净电功率的不确定性进行分析。LHS的取样次数均为150次。

表1 不确定参数的取值范围及分布

参数	参数意义	取值范围	均值取值
N_{CH_4}	甲烷流量/(mol·s ⁻¹)	0.1~0.4	0.3
STCR	氢碳比S/C	2~3	2.5
P_{system}	系统设计压力/Pa	1~4	2
Uf_{SOFC}	SOFC燃料利用率/%	0.55~0.85	0.7
T_{SOFC}	SOFC操作温度/°C	850~1 050	1 000
Uf_{PEM}	PEMFC燃料利用率	0.6~0.9	0.85

3.1 系统净电功率的不确定性分析

从图4可知,SOFC-PEM发电系统净电功率均值 μ_P 为132.27 kW,标准差 σ_P 为11.77 kW。在 $\mu_P - \sigma_P$ 和 $\mu_P + \sigma_P$ 方差带之间,系统净电功率值落入该区域的概率大约为60%,说明由表1所示的参数空间决定的模型模拟结果存在较大的不确定性。模拟结果值落入 $\mu_P - \sigma_P$ 和 $\mu_P + \sigma_P$ 之间的置信区间的概率越大,说明模型模拟结果精度越高。另外,系统净电功率与不确定参数的概率分布不严格相同,体现了系统净电功率与输入参数的非线性关系,这也是相比于区间分析方法,基于抽样的不确定性分析方法更适用于系统稳健性设计的原因^[6]。

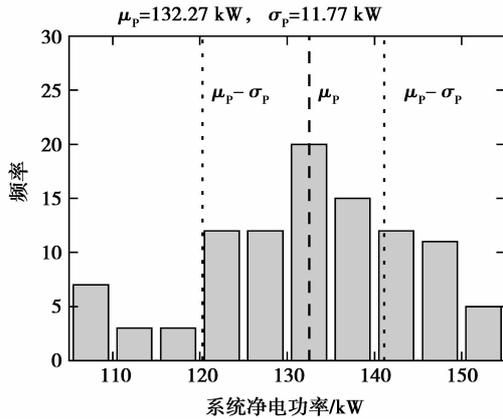


图 4 系统净电功率概率分布直方图

3.2 参数灵敏性分析及不确定性分析

传统的灵敏性分析没有考虑输入参数的概率结构,也不能定量表示任何给出模拟结果的概率。灵敏度分析和不确定性分析是同时进行的,可以说灵敏度分析是评估不确定性的一种确定性方法。

首先改变不确定参数 ξ 的离差系数 COV_{ξ} 在 $0 \sim 0.1$ 范围内变化,通过不确定性分析方法,统计得到系统净电功率的均值和标准差,计算净电功率的离差系数 COV_p ,建立 $COV_p \sim COV_{\xi}$ 关系,然后改变不确定参数均值 μ ,建立第 i 个不确定参数在不同均值水平下的 $COV_p \sim COV_{\xi}$ 关系曲线,曲线之间分离程度越大,表示该参数的灵敏度越大。从图 5 可知,6 个参数的灵敏度从大到小依次是 $Uf_{SOFC} > T_{SOFC} > N_{CH4} > P_{system} > Uf_{PEM} > STCR$ 。

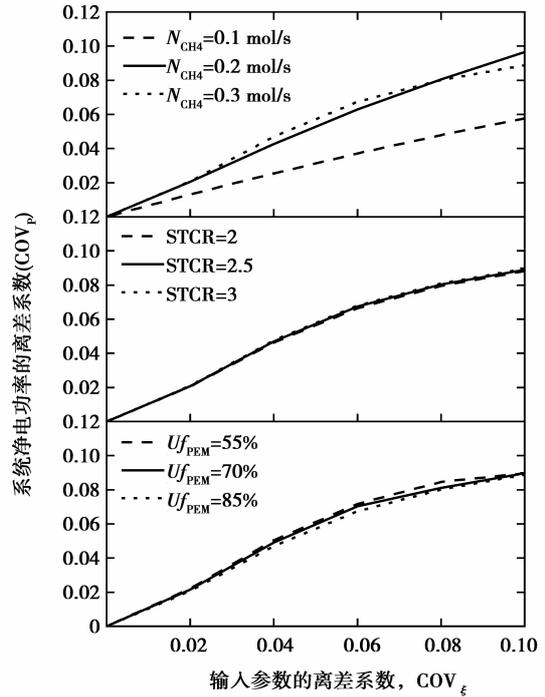


图 5 不确定参数在 3 种不同水平下对系统净电功率离差系数的影响

从图 5 可知,当所有参数的不确定性 COV_{ξ} 增加,系统净电功率的不确定性 COV_p 亦增加,所以需要尽可能地严格控制不确定参数的精度,然而这意味着会提高系统成本和难度。所以,可以通过找到合理的参数均值,使得系统净电功率的离差或波动减少。

3.3 不确定参数对系统性能的影响

根据前面的参数灵敏度分析,文中选取最灵敏的 3 个参数 Uf_{sofc} 、 T_{sofc} 、 N_{CH4} 作进一步分析。

从图 6 可知,系统净电功率随燃料利用率的升

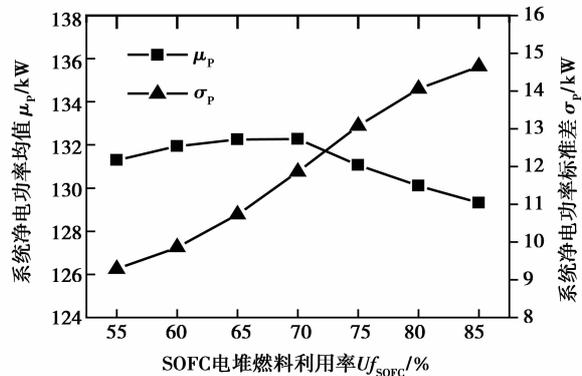
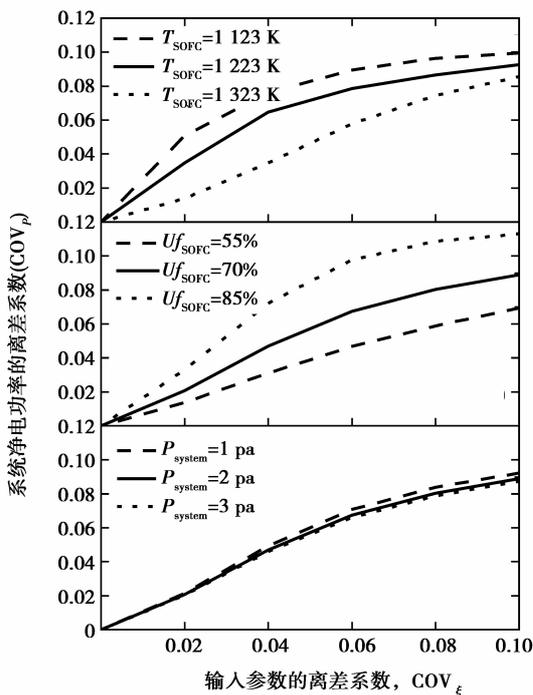


图 6 SOFC 电堆燃料利用率对系统性能与稳健性的影响

高先增加后减少。这是因为随着 Uf_{SOFC} 的增加, SOFC 消耗的燃料增加, SOFC 输出功率增加, 然而也导致进入 PEMFC 的燃料减少, PEMFC 输出功率减少; 另外, 随着 Uf_{SOFC} 增加, 若为维持 T_{SOFC} 不变, 则需要更多的空气将多余的热量带出电池, 空气侧压缩机耗电逐渐增加, 当 Uf_{SOFC} 达到一定值, 系统净电功率逐渐增加的最大值然后逐渐下降, 对应最大功率点的燃料利用率为 70%。然而, 增加 Uf_{SOFC} , 系统净电功率的不确定性增加, 表现为系统净电功率的标准差增加。

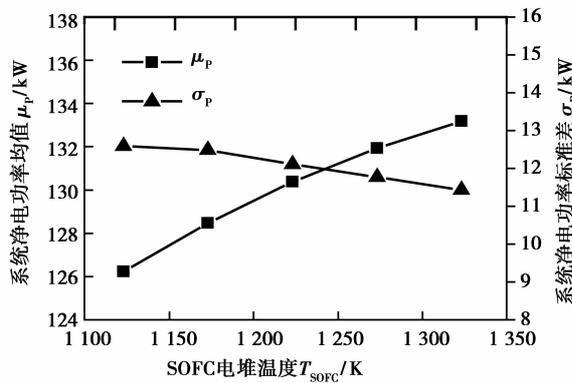


图 7 SOFC 电堆温度对系统性能与稳健性的影响

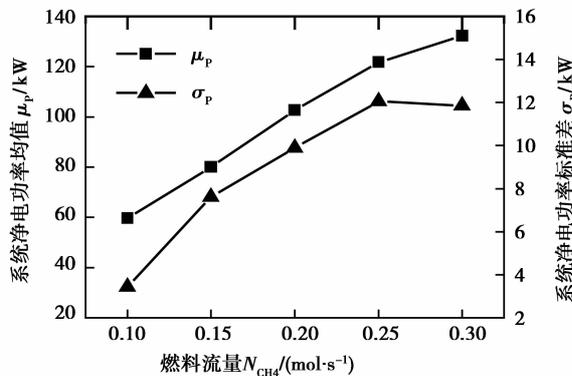


图 8 燃料流量对系统性能与稳健性的影响

从图 7 可知, 升高 T_{SOFC} , SOFC 输出功率增加, 系统净电功率增加, 并且系统净电功率的不确定程度减少, 因此控制 SOFC 电堆操作温度在较高的水平有利于对系统性能和稳定性的提高。

从图 8 可知, 增加燃料流量, 系统净电功率增加, 同时, 系统净电功率的不确定性也将增加。

综上所述, 高系统性能对应的是高 SOFC 电堆操作温度、高燃料流量和适当燃料利用率的操作条件, 而低系统性能偏差对应的是高 SOFC 电堆操作

温度、低燃料流量和低 SOFC 燃料利用率, 2 个不同准则所决定的参数空间存在冲突。决策人员可根据实际要求在系统性能最优化与减少系统性能波动之间找到较好的平衡。

4 结 论

采用基于 LHS 抽样方法的不确定性分析方法对 SOFC-PEM 联合发电系统模型进行了不确定性分析, 回答了系统操作参数的分布(均值、标准差)已知, 系统性能的分布是什么的问题, 并且研究操作参数影响系统净电功率的规律, 从这些规律可以得到以下结论。

1) 通过对比各参数在不同水平均值下的 $\text{COV}_P \sim \text{COV}_\xi$ 关系曲线的分离程度, 参数对系统净电功率的不确定性的影响程度从大到小的排列为: $Uf_{\text{SOFC}} > T_{\text{SOFC}} > N_{\text{CH}_4} > P_{\text{system}} > Uf_{\text{PEM}} > \text{STCR}$ 。

2) 通过不确定分析方法计算, 可得到模型模拟结果的频率分布图, 该图可以评估模型的总体性能及其不确定性, 即可以知道模型的模拟精度能达到怎样的水平。不同的不确定参数空间, 同样的系统模型获得不同的模拟精度。所以改变不确定因素的均值, 可以减少系统性能的偏差和波动。

3) 通过分析不确定参数对系统净电功率均值与标准差的影响, 可知高系统性能(均值)对应的是高 SOFC 电堆操作温度、高燃料流量和适当燃料利用率的操作条件, 低系统性能偏差(标准差)对应的是高 SOFC 电堆操作温度、低燃料流量和低 SOFC 燃料利用率。决策人员可根据不同的侧重点, 选择最适合自己的决策方案。

4) 文中选择了部分不确定参数来描述不确定性分析方法, 随着能源利用系统的不断创新和复杂化, 需要考虑更多的不确定性因素。不确定性分析为能源利用系统的优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘德顺, 岳文辉, 杜小平. 不确定性分析与稳健设计的研究进展[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1834-1841. LIU DE-SHUN, YUE WEN-HUI, DU XIAO-PING. Study on uncertainty analysis and robust design: a review [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1834-1841.
- [2] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] HISHENS I A, ALSEDDIQUI J. Sensitivity, approximation and uncertainty in power system dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21(4): 1808-1820.

- [4] GAMOU S, YOKOYAMA R, ITO K. Optimal unit sizing of cogeneration systems in consideration of uncertainty energy demands as continuous random variables [J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(9-12):1349-1361.
- [5] SUBRAMANYAN K, DIWEKAR U. Characterization and quantification of uncertainty in solid oxide fuel cell hybrid power system [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 142(1-2):103-116.
- [6] SUBRAMANYAN K, DIWEKAR U. Optimizing model complexity with application to fuel cell based power systems [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, 46(11):1116-1128.
- [7] DIWEKAR U, RUBIN E S, FREY H C. Optimal design of advanced power systems under uncertainty [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38 (15-17):1725-1735.
- [8] MAWARDI A, PITCHUMANI R. Effects of parameter uncertainty on the performance variability of proton exchange membrane (PEM) fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1-29):232-245.
- [9] YUNHUA, ZHU. Evaluation of gas turbine and gasifier-based power generation system [D]. North Carolina State University, 2004.
- [10] DIWEKAR U. A novel sampling approach to combinatorial optimization under uncertainty [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2003, 24: 335-371.
- [11] OLSSON A M J, SANDBERG G E. Latin hypercube sampling for stochastic finite element analysis [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128 (1): 121-124.
- [12] ANDREW L, FELLOWS R G, MESCAL C M, et al. A study of sofc-pem hybrid systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2000, 86(1-2):501-506.
- [13] SUBRAMANYAN K, DIWEKAR U. Multi-objective optimization for hybrid fuel cells power system under uncertainty [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 132(1-2):99-112.
- [14] YOKOO M, TAKE T. Simulation analysis of a system combining solid oxide and polymer electrolyte fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 137(2):206-215.
- [15] YOKOO M, WATANABE K, ARAKAWA M, et al. Numerical evaluation of a parallel fuel feeding SOFC-PEFC system using seal-less planar SOFC stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 153(1):18-28.
- [16] YOKOO M, WATANABE K, ARAKAWA M, et al. The effect of fuel feeding method on performance of SOFC-PEFC system [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(2):836-845.
- [17] YOKOO M, WATANABE K, ARAKAWA M, et al. Influence of current densities in SOFC-PEFC combined system [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 163 (2): 892-899.
- [18] CHAN S H, DING O L. Simulation of a solid oxide fuel cell power system fed by methane [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(2):167-169.
- [19] MENG N, MICHAEL K H, DENNIS Y C. Parametric study of solid oxide fuel cell performance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(5):1525-1535.
- [20] 谭玲君, 杨晨. 在非确定条件下对质子交换膜燃料电池性能的模拟研究 [C] // 大连: 工程热物理学会能源与热力学分会, 2009.
- [21] BARBIR F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice* [M]. [S. l.]: Elsevier Academic Press, 2005.

(编辑 陈移峰)