

基于多目标粒子群算法的SOFC/MGT混合发电系统热电优化研究

邵晨凡¹, 侯吉廷¹, 朱鸿翔²

¹国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠

²融研(上海)电气技术有限公司, 上海

收稿日期: 2025年7月9日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机构成的混合发电系统因其高效率 and 低排放特性在分布式发电系统中具有广泛应用前景。然而, 该系统存在强耦合, 非线性等特点, 特别是在复杂工况下运行时, 其性能优化问题尤为突出。为实现系统在不同负载条件下的高效稳定运行, 本文提出了一种基于多目标粒子群优化(MOPSO)算法的热电协同优化方法, 以系统发电效率和输出电压为双重优化目标。通过建立详细的动态优化模型, 选取关键决策变量并设定合理的边界约束, 结合MOPSO算法探索Pareto最优解集, 最终获得不同工况下的最优运行参数组合。研究表明, 该方法能显著提升系统在典型运行条件下的能效表现, 系统效率最高可接近65%, 输出电压保持在0.64 V至0.74 V区间, 为SOFC/MGT系统的工程优化与智能控制提供了理论依据与技术支持。

关键词

SOFC/MGT混合发电系统, MOPSO算法, 多目标优化

Research on Thermoelectric Optimization of SOFC/MGT Hybrid Power Generation System Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

Chenfan Tai¹, Jiting Hou¹, Hongxiang Zhu²

¹Wuzhong Power Supply Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong Ningxia

²Rongyan (Shanghai) Electric Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 9th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 12th, 2025

文章引用: 邵晨凡, 侯吉廷, 朱鸿翔. 基于多目标粒子群算法的 SOFC/MGT 混合发电系统热电优化研究[J]. 电气工程, 2025, 13(3): 55-62. DOI: 10.12677/jee.2025.133006

Abstract

The hybrid power generation system composed of solid oxide fuel cell and micro gas turbine has a wide application prospect in distributed power generation system because of its high efficiency and low emission characteristics. However, the system has the characteristics of strong coupling and nonlinearity, especially in complex operating conditions, its performance optimization problem is particularly prominent. In order to realize the efficient and stable operation of the system under different load conditions, this paper proposes a thermoelectric collaborative optimization method based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm, which takes the power generation efficiency and output voltage of the system as the dual optimization objectives. By establishing a detailed dynamic optimization model, selecting key decision variables and setting reasonable boundary constraints, and combining with MOPSO algorithm to explore the Pareto optimal solution set, the optimal operation parameter combination under different working conditions is finally obtained. The research results show that this method can significantly improve the energy efficiency performance of the system under typical operating conditions, the maximum system efficiency can be close to 65%, and the output voltage is kept in the range of 0.64 V to 0.74 V, which provides a theoretical basis and technical support for the engineering optimization and intelligent control of sofc/mgt system.

Keywords

SOFC/MGT Hybrid Power Generation System, MOPSO Algorithm, Multi Objective Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着全球对低碳清洁能源需求的不断上升，绿色技术的发展成为缓解能源危机和环境问题的当务之急。特别是固体氧化物燃料电池(SOFC)技术，因其卓越的效率和对多种燃料的适应性，正成为未来能源转换的关键趋势。微型燃气轮机与燃料电池技术[1]-[3]，由于其出色的效率和较低的污染排放，在分布式发电领域持续受到重视。固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种能直接将燃料化学能转化为电能的装置。相比其他燃料电池，SOFC 具有更高的工作温度、更优的能量转换效率以及更强的燃料适应性，且无需依赖贵金属作为催化剂，因此被视为极具应用前景的燃料电池之一[4]。

将 SOFC 与微型燃气轮机(Micro Gas Turbine, MGT)耦合形成的混合系统，能够实现废热回收与余能再利用，系统总效率远超单一发电单元。特别是在电力系统对能源可靠性和负载响应能力要求较高的场景中，SOFC/MGT 系统表现出良好的应用潜力。然而，该系统在结构上呈现出多变量耦合和非线性动态行为，受到诸多热力学与电气参数的制约，传统优化方法难以在全工况下实现全局最优控制。尤其在多目标(如效率与输出电压)同时优化的任务中，系统性能常常面临权衡问题。为此，本文引入多目标粒子群优化算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)，构建系统动态优化模型，并在典型运行工况下开展仿真分析，以期 SOFC/MGT 系统的智能运行调度提供决策依据。此外，本文所研究的 SOFC/MGT 混合动力系统模型是基于本团队开发的混合动力系统模型，相较于传统 SOFC/MGT 混合动力系统，该模型采用了多级换热等改良措施，其具体的数学模型及参数设计在文献[5]中可查阅。

2. 多目标粒子群优化算法

在处理多目标优化问题时，通常需要对多个目标函数进行同步优化。然而，这些目标函数之间往往存在相互冲突的关系，这使得直接获得理想的优化结果变得颇具挑战性。为解决此类问题，学术界已发展出多种传统求解策略，包括分层求解法、目标规划法以及评价函数法等[6]，在多目标优化问题的研究范畴内，目标函数通常需满足可微性条件，且在每次迭代求解过程中仅能获取单一解。显然，前述方法难以实现对多目标优化问题解空间的全面且高效探索。随着科技的持续进步，智能优化算法已经成为解决多目标优化问题的关键方法之一[7]。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)自提出以来，因其卓越的性能而受到学术界的广泛关注。经过改进的多目标粒子群优化算法在处理多目标优化问题方面展现了更为卓越的效率和精确度。

2.1. 多目标优化问题及其原理

多目标优化问题(Multiobjective Optimization Problem, MOP)通常涵盖在优化过程中对多个目标进行最大值或最小值的探寻。然而，在实际应用情境中，优化问题的求解往往受到物理现象等因素的制约，必须在此类约束条件下展开。因此，具有约束的多目标优化问题可表述为以下数学形式：

$$\begin{aligned} \min : F(X) &= [f_1(X), f_2(X), \dots, f_G(X)] \\ \text{Subject to : } &R_i^{lower} \leq x_i \leq R_i^{upper}, i = 1, 2, \dots, d \\ &g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ &h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \end{aligned}$$

式中： $F(X)$ ——优化问题的目标函数， G ——优化目标的个数， $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ ——决策变量， $[R_i^{lower}, R_i^{upper}]$ ——变量 x_i 的搜索范围， $g_1(x)$ 和 $h_1(x)$ ——决策空间的约束。

对于搜索空间内点 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_d)$ 和点 $Z = (z_1, z_2, \dots, z_d)$ ，在多目标优化问题中，解的优劣通常通过 Pareto 支配关系进行评判。具体而言，点 Y 支配点 Z ，当且仅当点 Y 在所有目标函数上的取值均不大于点 Z ，并且在至少一个目标上，点 Y 的取值严格优于点 Z 的取值。若某一解在不被其他解所支配的情况下存在，则该解被定义为 Pareto 最优解。由所有 Pareto 最优解的目标函数值构成的集合，被称为 Pareto 前沿。

2.2. 多目标粒子群优化算法及其原理

2.2.1. 粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)系 Kennedy 与 Eberhart 于 1995 年所提出，鉴于其显著优越性，业已广泛应用于函数优化、神经网络训练、参数调优及工业系统优化等领域[8]。相较于遗传算法，粒子群优化(PSO)策略保留了基于种群的全局搜索机制，通过粒子间的相互协作与竞争实现全面的搜索过程。然而，PSO 采纳了速度-位移模型，通过粒子在解空间中追踪当前最优解来更新其位置，从而有效规避了遗传算法中复杂的遗传操作过程[9]。

在每次迭代中，PSO 通过筛选全局最优粒子，并根据每个粒子的历史记录确定个人最优解，进而引导粒子的运动方向，直到全局最优解不再变化或达到预设的计算次数上限。

粒子群算法的粒子速度和位置更新可由下式来描述：

$$\begin{aligned} V_i^{(t+1)} &= w \cdot V_i^t + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (pbest_i^t - X_i^t) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (gbest^t - X_i^t) \\ X_i^{(t+1)} &= X_i^t + V_i^{(t+1)} \end{aligned}$$

式中： w ——惯性权重； c_1, c_2 ——加速度常数，一般认为 $c_1, c_2 \in (0, 4)$ ； $rand_1, rand_2$ ——随机数，一般认为 $rand_1, rand_2 \in (0, 1)$ ； $pbest'_i$ 为第 t 次迭代时粒子 i 的最优位置； $gbest'_t$ 为第 t 次迭代整个种群所经历的全局最优位置； X'_i 和 V'_i 为粒子 i 在第 t 次迭代的位置和速度。

2.2.2. 多目标粒子群优化算法流程

多目标粒子群优化算法(MOPSO)是粒子群优化算法(PSO)的延伸算法，通常被用于解决具有多个目标函数的优化问题。MOPSO 在使用时需要同时优化多个互相冲突的目标，因此通常不存在一个单一的最优解，而是一组 Pareto 最优解。MOPSO 保留了 PSO 的基本框架，并通过引入 Pareto 支配、非支配排序、拥挤度计算和外部存档等机制，有效应对多目标优化问题。这些改进使得 MOPSO 能够在全局范围内搜索最优解，同时保持解集的多样性和广泛性。MOPSO 已广泛应用于工程优化、能源优化和机器人路径规划等领域，具有较强的适应性和较高的计算效率。MOPSO 算法流程图如图 1 所示：

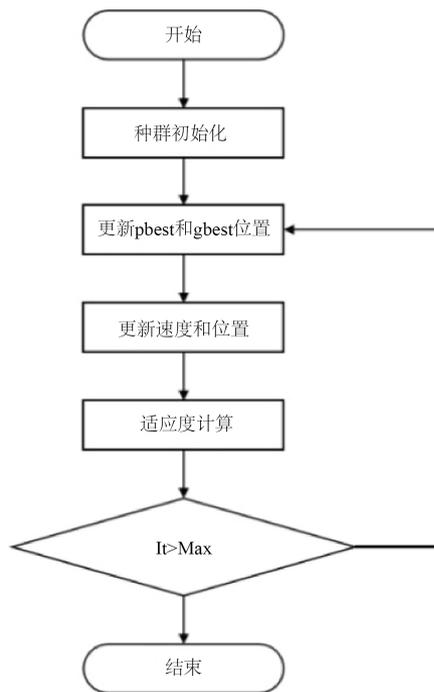


Figure 1. MOPSO algorithm flowchart
图 1. MOPSO 算法流程图

算法的具体步骤如下：

- (1) 开始：流程从开始节点启动。
- (2) 种群初始化：初始化粒子群的位置和速度。
- (3) 更新 pbest 和 gbest 位置：更新每个粒子的个体最佳位置(pbest)和群体的全局最佳位置(gbest)。
- (4) 更新速度和位置：根据当前的 pbest 和 gbest 更新粒子的速度和位置。
- (5) 适应度计算：计算每个粒子的适应度，通常根据目标函数进行评估。
- (6) 终止条件检查：
如果当前迭代次数 It 达到最大迭代次数 Max ，则算法结束。
如果没有达到最大迭代次数，则返回到步骤 3，继续进行下一次迭代。
- (7) 结束：当满足终止条件时，结束算法。

3. 基于 MOPSO 的 SOFC/MGT 混合动力系统动态优化

3.1. SOFC/MGT 混合动力系统动态优化模型

动态优化是在一系列约束条件下，通过控制决策变量来使优化目标函数达到最佳效果的方法。在 SOFC/MGT 混合动力系统的动态优化框架中，可以分为决策变量选择、目标函数设定以及约束条件制定三个部分。

决策变量的选取是进行动态优化的第一步。在动态优化问题中，决策变量通常是系统中可调节的参数，它们的值决定了系统的行为和性能。正确选择决策变量至关重要，因为它们会对优化最终结果造成直接影响。混合动力系统在运行过程中，燃料利用率 FU 的大小对系统的发电效率影响极大。燃料利用率过大会导致系统效率降低，过小则会导致燃料亏空。混合动力系统的工作电流可以改变系统的输出功率，电堆的输出电流 I 同时也代表着负荷的需求。通过调节燃料旁通阀开度 BP_f 可以控制透平入口温度和系统发电效率，空气旁通阀开度 BP_{air} 可以调节电堆的工作温度。通常燃料旁通阀开度过高会导致电堆燃料亏空和透平涡轮叶片热分解，过低则会影响系统的发电效率。而空气旁通阀开度大小则影响了电堆的阴极入口温度。根据混合动力系统的结构可以得出，燃气轮机中的压气机为系统提供空气，即燃气轮机的转速 n 决定了进入系统的空气流量大小，转速的改变也会在一定程度上影响电堆的工作温度。为此，本文将燃料利用率 FU 、输出电流 I 、燃料旁通阀开度 BP_f 、空气旁通阀开度 BP_{air} 和燃气轮机的转速 n ，这五个变量作为系统动态优化的决策变量。

优化目标函数是动态优化问题中获取最大值的关键指标。在 SOFC/MGT 混合动力系统中，常见的优化目标包括系统的效率、输出功率等。优化目标应根据系统的具体应用场景和研究需求来设定，SOFC/MGT 混合动力系统的复杂结构导致了其通常有多个优化目标，这就需要在对某个目标进行动态优化时，也要保证其他优化目标达到期望值。系统的发电效率和输出电压可以衡量其作为发电设备的基本能力，因此，本文选取混合系统的发电效率和输出电压作为优化目标，期望得到系统运行时的最优发电效率和最大输出电压。

动态优化过程中需要对系统运行的边界条件进行约束。在 SOFC/MGT 混合动力系统中，一般将影响系统安全性，稳定性的参数动态范围作为边界条件，以保证动态优化的结果符合混合系统的实际运行条件。

综上，该混合动力系统动态优化模型的优化目标可描述为： $Max\{SE(x), V_{st}(x)\}$ ，其约束条件由式(4-4)所示：

$$(1) x = \left\{ \begin{array}{l} (FU, n, BP_{air}, BP_f, I) \\ \left. \begin{array}{l} 0.6 \leq FU \leq 0.9 \\ 35000 \leq n \leq 70000 \\ 0 \leq BP_{air} \leq 0.3 \\ 0 \leq BP_f \leq 0.3 \\ 10 \leq I \leq 80 \end{array} \right\} \right.$$

$$(2) P_{net}(x) = P_{set} (1 \pm 100W)$$

$$(3) T_i(x) = \left\{ \begin{array}{l} T_b - 1500K \\ 873K - T_{st} \\ T_{st} - 1173K \\ \Delta T_{inlet} - 200K \\ TIT - 1173K \end{array} \right.$$

3.2. 多目标优化结果分析

根据文献[10]的研究, 结合 SOFC/MGT 混合动力系统的数据规模和计算平台算力, 将本文的 pareto 种群规模设置为 20, 迭代次数上限为 100。以 $n = 0.5$ 为例, 绘制得到混合动力系统运行在 125 kW 工况下的 pareto 前沿, 如图 2 所示。

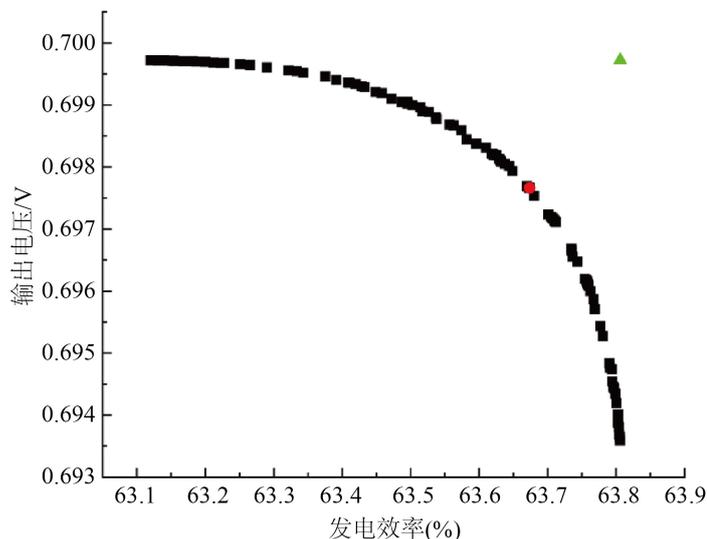


Figure 2. Pareto front based on system power generation efficiency and output voltage

图 2. 基于系统发电效率和输出电压的 pareto 前沿

在本研究中, 黑色方块代表通过优化算法计算得出的所有满足约束条件的发电效率与输出电压值。绿色三角形则表示在理想状态下, 混合动力系统的输出最优值。红色圆形标识了实际运行条件下系统所能达到的最优输出点, 即多目标优化问题中所求的最优解。在保持混合动力系统输出功率恒定的前提下, 系统输出电压的升高将导致电流值的降低, 而电流大小直接关联到电堆的工作温度。随着电堆工作温度的下降, 电堆内部燃料消耗量减少, 而系统输入的燃料流量维持不变。因此, 系统输出电压的提高将导致发电效率的降低。

由于负载运行时工况变化复杂, 而混合动力系统性能变化范围一般在 10% 以内。因此, 采用上述方法, 分别在 115 kW 和 125 kW 工况下, 针对不同转速条件求解了系统的最优输出电压和发电效率。两种工况下多目标优化的最优解分布结果分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 具体数值在表 1 和表 2 中展示。从图中可以看出, 优化后的系统发电效率几乎都超过了 60%。在 115 kW 工况下, 该系统的发电效率甚至接近 65%。

而在 125 kW 工况下, 系统的发电效率也约为 64%, 这表明混合系统的发电效率显著提升。此外, 当系统发电效率达到最优值时, 输出电压集中在 0.64 V 至 0.74 V 范围内, 表明系统的最优输出电压区间为 0.64 V 至 0.74 V。

Table 1. Optimal output point of the system under 115 kW operating condition

表 1. 115 kW 工况下系统最优输出点

输出电压/V	0.72257	0.62039	0.65857	0.68416	0.73564
发电效率/%	0.51286	0.6094	0.61872	0.64752	0.65002

Table 2. Optimal output point of the system under 125 kW operating condition

表 2. 125 kW 工况下系统最优输出点

输出电压/V	0.7393	0.66799	0.65857	0.65857	0.69335	0.69766
发电效率/%	0.5644	0.60714	0.61287	0.61872	0.63374	0.63674

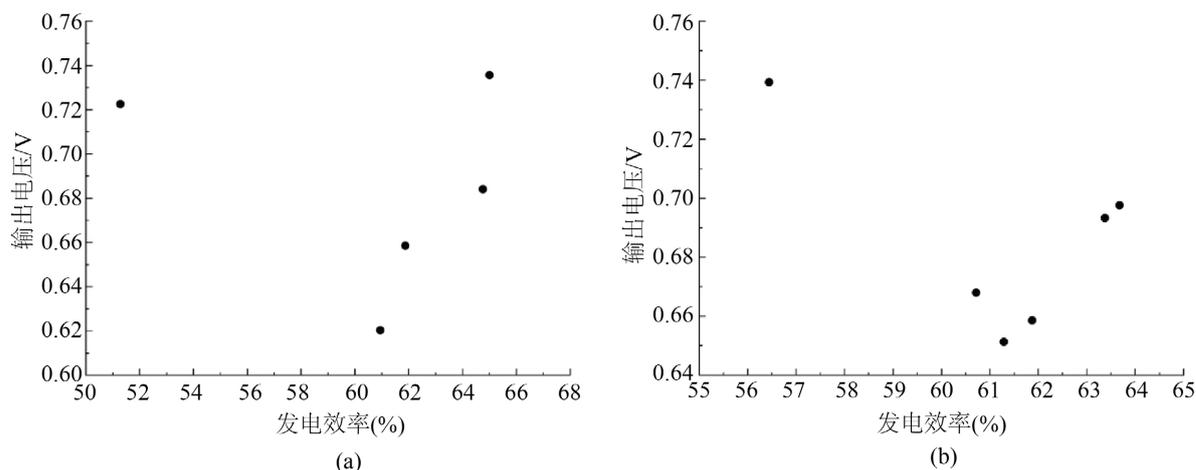


Figure 3. Optimal output point of the system under 115 kW and 125 kW working condition: (a) 115 kW; (b) 125 kW

图 3. 115 kW 和 125 kW 工况下系统最优输出点: (a) 115 kW; (b) 125 kW

4. 本章小结

针对固态氧化物燃料电池(SOFC)与微型燃气轮机(MGT)混合系统在应对动态负载变化时的热电性能优化问题, 本文构建了一个多目标优化模型, 并采用多目标粒子群优化(MOPSO)算法进行求解。通过精心设定优化目标与决策变量的组合, 本研究在多个典型运行点上实现了系统效率与输出电压的双重提升。研究表明, 多目标粒子群优化方法在平衡多个优化目标之间的冲突方面表现出色, 能够有效地获得一组完整的 Pareto 最优解集。同时, 研究发现所选取的参数对系统性能的影响显著, 因此需要根据不同的工况进行动态调控。优化后的系统效率接近 65%, 充分验证了所采用方法在工程应用中的可行性和实用性。展望未来, 本研究计划进一步融合模型预测控制(MPC)与故障诊断策略, 以实现系统运行的自适应智能优化, 为 SOFC/MGT 混合发电系统在实际应用中的推广奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-76.
- [2] Singh, B. and Sharma, J. (2017) A Review on Distributed Generation Planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 529-544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>
- [3] Mehigan, L., Deane, J.P., Gallachóir, B.P.Ó. and Bertsch, V. (2018) A Review of the Role of Distributed Generation (DG) in Future Electricity Systems. *Energy*, 163, 822-836. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.022>
- [4] (2004) EG&G Technical Services, I. Fuel Cell Handbook. 7th Edition, U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service.
- [5] 霍海波, 朱鸿翔, 徐胜, 等. SOFC/MGT 混合动力系统性能分析及协同控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(6): 79-88.
- [6] 孙滢. 若干最优化问题的粒子群算法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [7] 郑金华, 邹娟. 多目标进化优化[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [8] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95—International Conference*

on Neural Networks, Perth, 27 November -1 December 1995, 1942-1948.

- [9] Boeringer, D.W. and Werner, D.H. (2004) Particle Swarm Optimization versus Genetic Algorithms for Phased Array Synthesis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **52**, 771-779. <https://doi.org/10.1109/tap.2004.825102>
- [10] 王丽. 基于数据驱动燃料电池燃气轮机(SOFC-GT)混合动力系统控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2024.