

[多能互补]

基于改进遗传算法的多能互补储能系统优化配置

文/夏章 朱明 李杰 席樱元 钱学达 许心宇
国网睢宁县供电公司

为提高系统在发电中的能源利用率，基于改进遗传算法的应用，以某多能互补储能系统为例，对其优化配置方法展开全面的设计研究。对比实验结果表明：应用设计方法进行系统的优化配置，测试过程中系统对能源的利用率始终稳定在较高水平。

随着全球能源结构的不断转型和可持续发展战略的深入实施，多能互补储能系统日益受到关注。不可再生能源如煤炭、石油的过度使用已引发严重的环境问题，迫使全球加快向风能、太阳能等清洁能源转型。

杨昆^[1]等人通过建立基于谈判博弈的多主体容量配置模型，利用交替方向乘子法（ADMM）对模型进行求解，实现微电网群与共享储能之间的成本最小化和电能交易支付谈判的最优配置，但谈判博弈模型的参数设置和初始条件对最终结果有显著影响，如何合理设定参数以保证模型的准确性和适用性仍需进一步研究。杨子建^[2]等人分析厂内多种负荷用能需求的不确定性，并建立厂用电不平衡状态感知模型。随后，以多能源储能系统综合成本最小、碳排放量最小和天然气利用效率最大为目标，构建多能源储能优化配置模型，并通过算例仿真验证其有效性。但模型的优化结果可能受到多种外部因素的影响，如电网调度、市场价格波动等，此部分因素在模型构建时可能难以全面考虑。

为发挥储能系统更高的效能，本文将基于改进遗传算法的应用，以某多能互补储能系统为例，对其优化配置方法展开全面的设计研究。

建立多能互补储能系统发电模型

建立多能互补储能系统的发电模型，需要综合考虑多种能源转换与存储方式，以及能源之间的协同工作。当作业环境风速>切入风速时，多余的风能可以用于发电，风机启动作业^[3]。以此为依据，建立如下计算公式所示的风能发电模型。

$$P' = P \frac{v - v_{in}}{v_N^2 - v_{in}^2} \quad (1)$$

式中， P' 为风能发电模型； P 为电动机起动功率； v 为作业环境风速； v_{in} 为切入风速； v_N 为额定发电风速。

在此基础上，光伏组件利用半导体效应，将太阳能直接转换成电能。其功率大小受太阳辐射量与组件温度双重影响，组件温度则是由环境温度、接收的太阳辐射强度及具体安装环境共同决定。总之，光伏组件的性能优化需关注辐射接收量与温度变化，两者直接关联到组件的发电效率，而组件温度又受环境、辐射及安装条件综合作用。建立光伏发电模型，表达式为

$$P'_1 = \frac{G'}{G} [1 + k(T - T')] G' \quad (2)$$

式中， P'_1 为光伏发电模型； G 为期望照度； G' 为实际环境照度； k 为温度系数； T 为环境温度； T' 为参

考温度。

发电过程中，燃气轮机通过稳定流动的气体，将化学能高效转化为有用功。利用叶轮受气体推动旋转，实现能量的转换与输出，驱动各类设备工作。建立燃气轮机模型，表达式为

$$F = \frac{E}{\eta} \quad (3)$$

式中， F 为燃气轮机模型； E 为机组消耗的天然气量； η 为机组作业效率。

完成单元组件模型的构建后，按照下述公式，建立发电机组模型，表达式为

$$f = \sum P' + P_1' + F \quad (4)$$

式中， f 为多能互补储能系统发电机组模型。

按照上述步骤，完成多能互补储能系统发电模型的构建。

基于改进遗传算法构建系统能量调度目标函数

引进改进遗传算法，进行系统能量调度目标函数的构建。在多能互补储能系统中，主要目标是优化能源的分配和使用，以满足负载需求。在此过程中，利用算法，生成初始种群，每个个体代表一个可能的能量调度方案，设定发电机的输出功率、储能设备的能量存储量，系统的总负载需求，设定约束条件进行变量控制。约束条件表达式为

$$p_{g,t}^{\min} \leq p_{g,t} \leq p_{g,t}^{\max} \quad (5)$$

$$e_{s,t}^{\min} \leq e_{s,t} \leq e_{s,t}^{\max} \quad (6)$$

$$\sum_g p_{g,t} + \sum_s (e_{s,t-1} - e_{s,t}) \geq D_t \quad (7)$$

式中， $p_{g,t}$ 为在时间 t 时，发电机 g 的输出功率； $p_{g,t}^{\min}$ 、 $p_{g,t}^{\max}$ 为 $p_{g,t}$ 的最小值与最大值； $e_{s,t}$ 为在时间 t 时，储能设备 s 的能量存储量； $e_{s,t}^{\min}$ 、 $e_{s,t}^{\max}$ 为 $e_{s,t}$ 的最小值与最大值； D_t 为在时间 t 时，系统的总负载需求（假设储能设备放电为正，充电为负）。

构建目标函数如下

$$A = \sum \left(\lambda_{\max} (p_{g,t} + e_{s,t} + D_t)^2 / f \right) \quad (8)$$

式中， A 为系统能量调度目标函数； $\lambda_{\max}$ 为未满足负载需求的最大惩罚系数。

使用目标函数 A 计算每个个体的适应度。适应度越低（对于最小化问题），个体越优。同时，使用轮盘赌选择、锦标赛选择等方法，根据适应度选择个体进行繁殖，对此过程中生成的子代进行交叉

处理，此过程应确保新个体满足约束条件。按照上述步骤，完成基于改进遗传算法构建系统能量调度目标函数。

目标函数求解与系统优化配置设计

完成上述设计后，可以采用对目标函数求解的方式，进行多能互补储能系统的优化配置设计。在此过程中，考虑到多能互补系统的复杂度较低，因此，引进遗传算法方法，建立多能互补中的最优求解函数，对目标进行迭代，此过程为

$$C = \frac{a_g p_{g,t} + b(y)}{\delta} \quad (9)$$

式中， C 为目标函数迭代； a 为迭代次数； b 为成本系数； y 为随迭代次数递减参数； δ 为精英保留数量。

迭代过程中，如果交叉和变异操作生成的个体违反了约束条件，则进行修复或重新生成，直到满足所有约束。重复上述步骤，直到达到停止条件（如适应度不再显著提高）。选择适应度最低的个体作为最优解，即系统能量调度的最佳方案。通过上述方式，完成目标函数求解与系统优化配置设计。

对比实验

1. 实验准备

本研究的试点选择某地区大型水/光互补电站，该电站是世界上装机规模最大的单体多能互补电站之一。电站水库具备多年调节能力，总装机容量达到1 280 MW，年利用小时数4 642 h。其配套的光伏电站位于水库左岸，年利用小时数1 508 h。电站的服务对象广泛，不仅为周边地区提供稳定的电力供应，还兼顾防洪、灌溉和旅游等综合效益。通过实际运行数据分析，发电站实现了水电与光电的有效互补，显著提高清洁能源的利用率和电网的稳定性，是展示多能互补储能系统优化配置效果的理想试点。对多能互补储能系统的技术参数进行分析，相关内容见表1。

在深入研究中发现，储能容量的配置大多未能精准匹配实际能源需求波动，导致储能效率低下。以某次具体事件为例，发电站因储能容量配置过剩，多出实际需求20%（约100 MW·h），造成每年约5%的额外投资成本浪费，相当于数千万人民币。

此外，储能系统的充放电策略未能充分利用不同能源的时间互补性，导致能源浪费和系统运行成本上升，影响了整体经济效益和环境效益。

表1 多能互补储能系统技术参数

序号	项目	参数
1	储能类型	锂离子电池、抽水蓄能、压缩空气储能等
2	储能容量/MW·h	>500
3	充电功率/MW	>100
4	放电功率/MW	>100（近似充电功率）
5	充放电效率（%）	锂离子电池：90%~95% 抽水蓄能：75%~85%
6	循环寿命/次	3 000~10 000

2. 实验步骤

针对上述内容，引进文献[1]提出的基于谈判博弈的优化配置方法，文献[2]提出的基于用电不平衡感知的优化配置方法，将其作为对照，设计对比实验。在此基础上，应用本文设计的方法与对照方法，进行系统优化配置。为确保配置工作的规范化实施，设计改进遗传算法的技术参数，见表2。

表2 改进遗传算法的技术参数

序号	项目	参数
1	种群大小	100
2	精英保留策略	保留5个最优个体
3	迭代次数/次	1 000
4	停止准则	适应度差异小于0.001或达到最大迭代次数
5	随迭代次数递减参数	0.9
6	种群多样性系数	0.01
7	染色体编码方式	实数编码
8	交叉操作类型	均匀交叉
9	变异操作类型	高斯变异

完成上述设计后，同时应用三种方法，进行多能互补储能系统优化配置。

3. 实验结果与分析

将多能互补储能系统的能源利用率，作为检验优化配置方法应用效果的关键指标，此指标能够直观反映系统在不同配置方案下的能效表现。通过对比不同方法下的能源利用率，可以评估其在提高清洁能源消纳能力、减少能源浪费、增强系统经济性和环境友好性方面的成效。实验结果如图1所示。

从图1所示的结果可以看出，应用本文方法进行系统的优化配置，测试过程中系统对能源的利用率始终稳定在较高水平，而应用文献[1]、文献[2]方

法配置后的系统，对能源的利用率则相对较低，且波动较大。

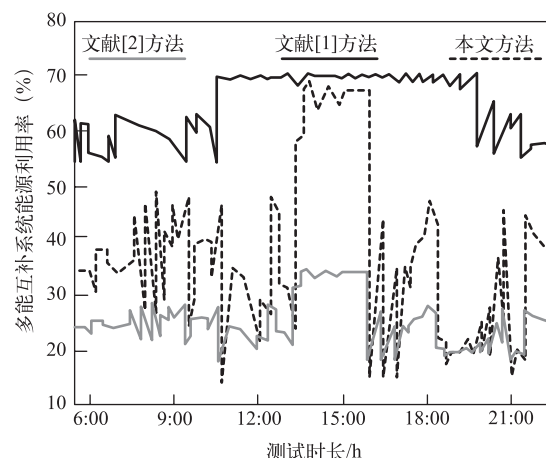


图1 多能互补储能系统优化配置后的能源利用率对比

结束语

多能互补储能系统通过整合多种能源类型和储能技术，实现了能源间的优势互补和供需平衡，成为解决能源结构转型中瓶颈问题的重要途径。多能互补储能系统的优化配置是一个复杂的优化问题，涉及多种能源类型、储能技术和系统约束条件。当下的优化方法难以处理多维度的优化问题，导致配置结果不够精确或经济性不足。遗传算法作为一种模拟自然选择和遗传学机理的搜索算法，具有全局搜索能力强、并行计算优势明显的特点，为解决多能互补储能系统优化配置问题提供新的思路。因此，通过建立多能互补储能系统发电模型、构建系统能量调度目标函数、目标函数求解，开展多能互补储能系统优化配置方法的设计研究。以此种方式，平抑可再生能源的波动性，提高电网的灵活性和可靠性，在能源低谷时储存能量，在高峰时释放，实现削峰填谷，提高整体能源利用效率。EA

（收稿日期：2024-08-14）

参考文献

- [1] 杨昆，刘通，柏林，等．基于谈判博弈的微电网群多主体共享储能容量优化配置策略[J]．电测与仪表，2024，61 (3): 33-41.
- [2] 杨子建，赵璐，王越超，等．计及厂用电不平衡状态感知与碳减排的多能源储能优化配置模型[J]．可再生能源，2023，41 (11): 1512-1519.