

基于改进遗传算法的梯级水光蓄联合互补优化研究

王茂豪 陈廷军 李俊杰* 于文萍

成都工业学院 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 论文针对梯级水光蓄联合互补优化调度问题, 提出一种基于改进遗传算法的优化方法。通过罚函数法、拥挤度计算等机制, 增强算法的全局搜索能力和收敛速度, 用改进的遗传算法来求解梯级水光蓄联合互补优化问题的最优解。该方法综合考虑梯级水电站、光伏电站和抽水蓄能电站的运行特性, 以系统发电效益最大化和弃光率最小化为目标, 构建多目标优化模型, 并将其与原始遗传算法相比较。仿真结果表明, 论文所提的改进遗传算法更有效, 能够有效协调水光蓄联合系统的运行, 显著提高能源利用效率和系统稳定性。

关键词: 梯级水光蓄; 联合互补优化; 遗传算法

Research on the Joint Complementary Optimization of Cascade Water Photovoltaic Storage Based on Improved Genetic Algorithm

Maohao Wang Tingjun Chen Junjie Li* Wenping Yu

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract: This paper addresses the issue of optimal scheduling for the complementary integration of cascade hydropower and solar energy, proposing an optimization method based on an improved genetic algorithm. By employing mechanisms such as penalty functions and crowding degree calculations, the algorithm's global search capability and convergence speed are enhanced, using the improved genetic algorithm to solve for the optimal solution to the cascade hydropower and solar energy complementary optimization problem. This method comprehensively considers the operational characteristics of cascade hydropower stations, photovoltaic power stations, and pumped storage power stations, aiming to maximize system power generation efficiency and minimize the rate of curtailed solar energy, constructing a multi-objective optimization model and comparing it with the original genetic algorithm. Simulation results indicate that the improved genetic algorithm proposed in this article is more effective, capable of efficiently coordinating the operation of the hydropower and solar energy integrated system, significantly improving energy utilization efficiency and system stability.

Keywords: cascade water optical storage; joint complementary optimization; genetic algorithm

0 前言

研究与实践显示, 风能、太阳能等可再生能源接入电网时会带来波动性与不确定性问题。为有效应对这一挑战, 将多种能源进行互补, 并借助储能装置构建互补电站开展联合发电, 能够显著提升可再生能源的并网效益^[1]。梯级水光蓄系统是一种将梯级水电站、光伏电站和抽水蓄能电站相结合的能源系统, 旨在实现可再生能源的高效利用和电力系统的稳定运行。梯级水电站通过多级水库的联合调度, 具备较强的调节能力; 光伏电站由于光照条件的影响, 使得其发电存在间歇性与波动性; 抽水蓄能电站则能够在有多余电量时储能, 在电力短缺时发电, 但其多目标、多约束又使得梯级水光蓄的联合互补优化问题变得复杂。

综上所述, 论文提出一种改进的遗传算法, 由于 Pareto 支配理论着眼于解空间, 通过对不同解之间支配关系的细致比较, 巧妙地将解空间划分为多个不同的非支配解集, 为多目标优化问题的高效解决开辟了有效路径。与此同时, 生物

启发式算法凭借其独特优势, 在多目标优化领域获得了越来越多学者的青睐与应用, 逐渐成为该领域研究的重要工具^[2], 所以通过罚函数法、拥挤度计算等机制来求解 Pareto 最优解集, 能够有效处理多目标优化问题和约束优化问题^[3], 最终实现如图 1 所示的梯级水光蓄的联合互补优化。

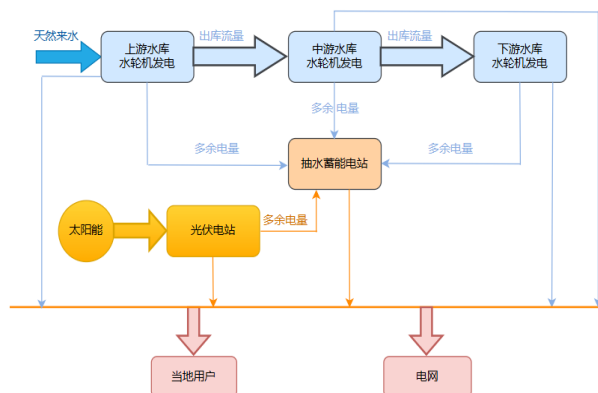


图 1 梯级水光蓄结构

1 改进的遗传算法

改进的遗传算法是在传统遗传算法^[4]基础上,通过引入新的策略和优化机制,从而提升计算的效率和改善适用性的优化方法。其核心改进包括罚函数法和拥挤度机制,能够根据种群进化状态动态调整参数,避免早熟收敛并增强全局搜索能力。同时,采用精英保留策略和小生境技术,有效保持种群多样性,防止掉进小部分最优。改进算法还结合局部搜索方法(如模拟退火、粒子群优化),在全局搜索的基础上增强局部寻优能力,提高解的精度。此外,改进遗传算法支持多目标优化和复杂约束处理,能够高效求解工程实际问题。通过并行计算和高效编码设计,算法收敛速度和计算效率显著提升,适用于大规模复杂优化场景。基于改进的遗传算法流程图如图 2 所示。

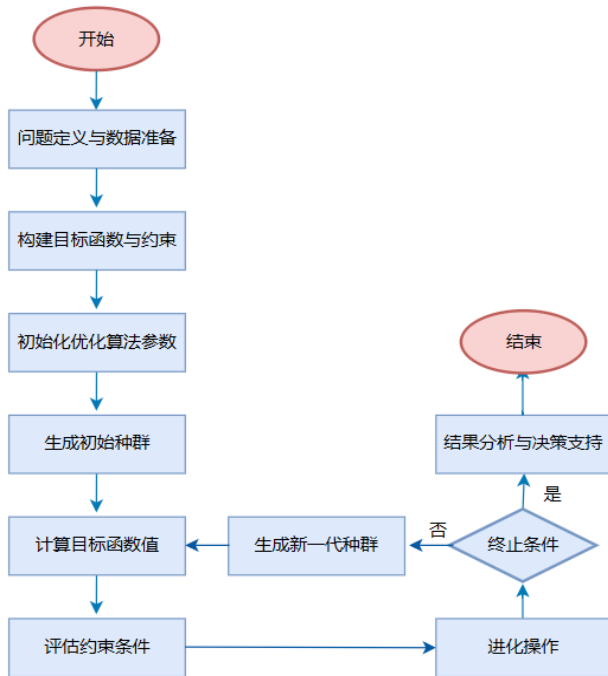


图 2 基于改进的遗传算法流程图

为验证改进遗传算法的改进效果,论文采用经典的多模态优化函数和 Rastrigin 函数进行优化测试,仿真结果如图 3 至图 5 所示。由图可知,改进后的遗传算法收敛速度更快并且收敛值更低。

① Ackley 函数:

$$f(x) = -20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)) + 20 + e \quad (1)$$

② Rastrigin 函数:

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (2)$$

式中, n 是变量的维度(即 x 的维度), x_i 是第 i 个变量, e 是自然函数(约等于 2.71828)。

2 实验过程及结果分析

本次研究对象是如图 1 所示的梯级水光蓄系统,包含水电站、光伏电站和抽水蓄能电站。正常情况下,梯级水光蓄以水光蓄互补模式运行,在满足梯级水光蓄系统约束条件的前提下再结合经济性和环保性,建立了梯级水光蓄经济效益最大化、运行成本最小的目标函数 1,如公式(1)所示。

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^T [(c_i P_{si} + c_i P_{wi} + c_i P_{fi} - c_{yi} P_{yi}) - c_q (P_{wqi}) - c_b (P_{buyi}) + c_s (P_{sell})] \quad (3)$$

$$P_{wtot} = P_w + P_{wqi} \quad (4)$$

式中, P_{si} 、 P_{wi} 、 P_{fi} 分别为光伏、梯级水电站、抽水蓄能电站直接输送到电网上的功率, P_{yi} 为抽水蓄电站抽水的功率, P_{wtot} 为梯级水电站总发电量, P_{wqi} 表示 i 时刻梯级电站总弃水量。在 i 时刻超过负荷 10% 以内多余电量可以向当地负荷售卖, P_{sell} 即为此刻售卖电的功率值。 P_{buyi} 则为总出力小于负荷时向电网购买的电, C_i 为 i 时刻的分时电价, C_{yi} 为 i 时刻抽水机组抽水电价,其值为分时电价的 0.25 倍, C_{qi} 为 i 时刻弃水的惩罚电价, T 为联合系统调度周期。

目标函数 2 为梯级水光蓄联合系统的弃水量最少,公式如下:

$$\min F_2 = \min(\sum_{i=1}^T P_{wqi}) \quad (5)$$

论文以中国四川省某地区的夏季参数用 MATLAB 软件进行仿真实验。由表 1 可知,在相同条件下,改进的遗传算法比原始的遗传算法得到的最优解更优,在梯级水光蓄的联合互补优化方面有更好的成效。

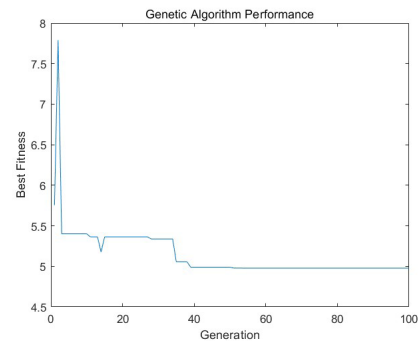


图 3 基于遗传算法测试函数 1 的结果

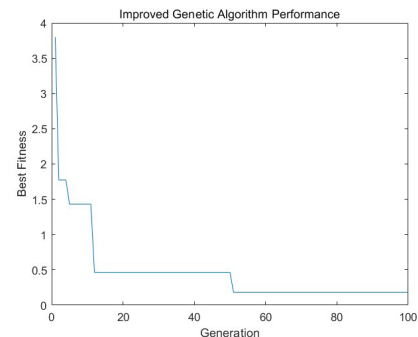


图 4 基于改进遗传算法测试函数 1 的结果

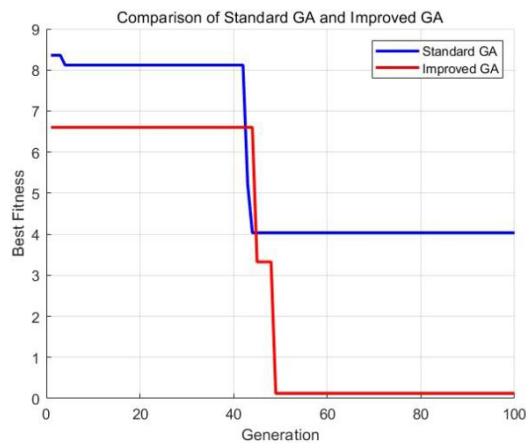


图 5 两种算法关于测试函数 2 的仿真结果对比图

表 1 两种算法仿真结果对比

指标	原始遗传算法	改进遗传算法
经济效益 / 千元	1300.526	1928.5
弃水量 /MW	12.48	12.406

3 结论

论文基于改进遗传算法，提出了一种梯级水光蓄联合互补优化方法，旨在实现可再生能源的高效利用和电力系统的稳定运行。首先，通过标准测试函数验证了论文提出的

改进遗传算法的可行性，收敛的值更低并且曲线平滑下降，波动较小。其次，将改进的遗传算法应用到梯级水光蓄联合互补优化目标函数中，得到了相应的仿真结果。最后，将改进的遗传算法结果与原始遗传算法的结果进行了比较，由仿真结果可得，改进的遗传算法所得到的经济效益更佳，效果更好。

参考文献：

[1] 李铁,李正文,杨俊友,等.计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J].电网技术,2020,44(10):3622-3630.

[2] 陈凯宇.黑水河流域梯级水电站集约化运营效益分析[J].广西水利水电,2024(2):131-136.

[3] 施思,徐阳栋,孙月明.约束多目标优化问题的一类内-外混合罚函数方法[J].高校应用数学学报A辑,2024,39(2):199-210.

[4] 陈秋莲,蒋环宇,郑以君.机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J].计算机工程与应用,2019,55(16):10-17.

作者简介：王茂豪（2003-），男，中国四川泸州人，在读本科生。

通讯作者：李俊杰（1976-），男，本科，讲师，从事电气工程教学与研究。

基金项目：四川省大学生创新创业训练计划项目（基于膜优化算法的梯级水光蓄互补发电能量优化系统，项目编号：NO.202411116067）。