

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211389

# 基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度

李飞<sup>1,2</sup>, 李咸善<sup>1,2</sup>, 李振兴<sup>2</sup>, 张彬桥<sup>2</sup>

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**“碳中和”背景下,以新能源为主体的新型电力系统正在大力建设,而化石型调节电源占比的降低给大规模新能源消纳带来了严峻挑战。为此,提出了基于梯级水电调节的多能联合发电系统优化调度模型,以减小因新能源的接入而给电网带来的功率波动冲击,并缓解电网调节资源配备压力。该日前调度模型以梯级水电平抑新能源接入后的负荷波动最小和系统综合成本最低为双重目标。针对模型中高维复杂约束问题,提出了一种改进的NSGA-II算法。该算法对选择策略中设定的比例因子进行了改进,并将正态分布算子引入交叉过程,以保证种群的多样性并提升算法在空间上的搜索能力。仿真结果表明所提模型能利用梯级水电有效平抑新能源入网波动,并兼顾多能发电系统综合经济效益。通过比较各种算法的结果,改进NSGA-II算法帕累托解的质量更优,且分布更均匀。

**关键词:** 梯级水电调节; 新能源消纳; 多能联合系统; 负荷波动; 快速非支配排序遗传算法

## Short-term optimal scheduling of multi-energy combined generation systems based on the regulation of cascade hydropower stations

LI Fei<sup>1,2</sup>, LI Xianshan<sup>1,2</sup>, LI Zhenxing<sup>2</sup>, ZHANG Binqiao<sup>2</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three

Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** With the background of ‘carbon neutrality’, the developing of novel power systems based on new energy and the decrease of fossil energy proportion have brought severe challenges to the consumption of large-scale new energy. Therefore, an optimal scheduling model of multi-energy combined generation system based on cascade hydropower regulation is built to reduce the power fluctuation caused by new energy resources and alleviate the regulated pressure related to the upper grid. The proposed model is established with the dual objectives of minimizing the load fluctuations and the overall costs of the system. An improved NSGA-II is proposed to analyze the proposed model at high dimension and complexity. The proportional factor in the selection strategy is improved, and a normal distribution operator is introduced into the crossover process to ensure the diversity of the population and improve the search ability. The simulation results show that the proposed model with cascade hydropower can effectively suppress the fluctuations caused by the new energy accessing to the grid, and improve the overall economic benefits of multi-energy generation systems. By comparing the results of various algorithms, the improved NSGA-II has obtained superior quality and better distribution of the Pareto solutions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

**Key words:** cascade hydropower regulation; new energy consumption; multi-energy combined system; load fluctuation; NSGA-II

## 0 引言

“双碳”目标引导下,火电占比大幅弱化的新

能源主导型电力系统建设<sup>[1-2]</sup>将面临大规模风光新能源消纳的严峻挑战。在现代新型电网中,火电机组调节容量有限,且受机组爬坡速率和碳排放约束的限制,其消纳新能源的能力大幅降低,急需寻求一种替代性清洁能源作为调节电源来缓解系统大规

模新能源消纳的压力。梯级水电作为重要的清洁能源，具有调节容量大、调节快速灵活等特点，在未来的很长一段时间可作为大规模新能源消纳的有效途径<sup>[3-5]</sup>。

新能源消纳的主要障碍来自其波动性和不可控性，且呈现一定的反调峰特性<sup>[6-8]</sup>。为了缓解和消除新能源接入给电网带来的波动冲击，本文拟采用梯级水电作为调节电源，对风光接入后的出力波动进行抑制，使得调节后的风光水出力曲线跟踪系统原有净负荷曲线(负荷减去自有新能源)的变化趋势，从而减轻电网配备调节资源的压力。剩余负荷则可通过火电机组平衡。为了兼顾新能源公司和梯级水电集团各方利益，考虑新能源完全消纳，梯级水电采用“以水定电”模式确定出力计划并考虑火电机组的综合成本，以获得最大发电效益。

目前，针对新能源消纳及多能系统联合发电调度已有大量研究成果，但在火电占比弱化的条件下，对基于梯级水电调节的新型电力系统的大规模新能源消纳还鲜有报道。文献[9]采用水电站自适应同步调峰策略来确定水电厂发电计划，以平衡新能源出力波动。文献[10]构建了考虑火电燃料成本、污染物排放成本和弃风弃光惩罚成本的多能联合发电系统调度模型，促进了新能源消纳。文献[11]建立了风-光-水-蓄多能互补优化调度模型，通过互补运营可提高可再生能源的利用率。文献[12]提出了一种风-光-火-抽蓄-蓄电池多时间尺度协调调度模型，通过挖掘各类电源的差异性和互补性，有效跟踪新能源和负荷的变化，实现系统经济运行。文献[13]从经济调度视角建立了风核协调调度模型，有效降低了弃风率。文献[14]提出了水风互补策略，优化了系统的碳排放量，但未考虑火电的经济性。文献[15]提出一种多类型水电协调参与风光消纳的联合运行策略，促进了风光新能源消纳。文献[16]建立了电力-天然气-风电系统综合能源双层优化调度模型，利用电转气模型消纳风电。文献[17]建立了考虑系统发电成本和弃风弃光惩罚的风-光-水-气-火-储联合优化调度模型，提高了新能源利用率，但未考虑新能源接入后负荷波动的平抑。文献[18]提出了一种基于抽蓄电站和蓄电池相结合的混合系统调度方法，实现了风电消纳和负荷波动平抑的双重目标。

在上述研究成果中，随着化石能源占比的削弱，且受本身碳排放限制，火电将无法继续承担新能源消纳的主导角色；储能设备因成本和技术限制，无法大规模投入去满足高比例新能源的接入需求；抽蓄电站虽能完成削峰填谷，但其调节能力受到其容

量的制约。目前对于流域梯级水电参与大规模风电等清洁能源的调节消纳和联合优化调度方法研究还较少，且梯级水电调节灵活，整体规模更大，存在进一步优化的空间<sup>[19]</sup>。

另外，由于调度模型中涉及复杂的水力系统和电气系统约束，且考虑火电机组的阀点效应和污染物排放的惩罚后，使得优化模型呈现高维、非线性、非凸等特点<sup>[20]</sup>，这对算法提出了更高的要求。目前流行的多目标优化算法主要有强度帕累托进化算法<sup>[21]</sup>、多目标微分进化算法<sup>[22]</sup>、多目标粒子群算法<sup>[23-24]</sup>等。文献[21]采用强度 Pareto(帕累托)进化算法求解微电网的能量分配问题，但该算法的局部搜索能力较差；文献[22]对多目标微分进化算法中的变异策略进行了改进，用于求解风光互补系统发电容量配置，改进后的寻优速度有了一定提升；文献[23]采用改进粒子群优化算法求解微电网储能容量配置问题，然而粒子群算法对初始值设置要求较高，且容易陷入局部最优。

NSGA-II(快速非支配排序遗传算法)为高维非线性优化问题提供了新的解决方案<sup>[25]</sup>，快速非支配排序和精英策略的配合提高了算法的求解性能，与 NSGA(非支配排序遗传算法)相比<sup>[26]</sup>，其计算复杂度大幅降低，且能加速 Pareto 前沿收敛，同时最大限度地保持各个优化目标之间的独立性。NSGA-II 已被成功应用于电力系统优化问题中，并取得了较好的效果，如微电网多目标经济调度<sup>[27]</sup>、综合能源系统多目标优化<sup>[28-29]</sup>、分布式电源优化配置<sup>[30]</sup>等。虽然 NSGA-II 算法作为一种经典算法已被广泛应用，但仍存在提升空间：比如进化初期外部精英种群的支配个体失去精英性，空间搜索能力不强等<sup>[27,31]</sup>。

基于上述分析，本文以梯级水电调节平抑新能源接入后引起的负荷波动最小为优化目标之一，同时考虑联合发电系统的综合成本最小为优化目标之二，构建了面向大规模新能源接入后基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度模型。进一步针对 NSGA-II 算法的不足，从选择策略中的比例因子、交叉算子两方面进行改进。仿真结果验证了本调度模型的有效性和改进 NSGA-II 算法的优越性。

## 1 基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度模型

含风光水火多能联合发电系统的优化调度目标主要包括梯级水电平抑新能源接入后的负荷波动最小、火电燃料费用最低、火电污染物排放最小、各发电系统运维费用最低等。

### 1.1 目标函数 1

联合系统的综合成本包括火电厂的燃料成本  $C_g$ 、各电厂的运行维护成本  $C_m$ 、污染物排放惩罚成本  $C_{SO_2}$  等, 如式(1)所示。

$$\min f_1 = C_g + C_m + C_{SO_2} \quad (1)$$

1) 考虑机组调点效应的火电厂燃料成本<sup>[27]</sup>

$$C_g = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} \alpha_i + \beta_i P_t^{gi} + \gamma_i (P_t^{gi})^2 + |e_i \sin(h_i (P_{\min}^{gi} - P_t^{gi}))| \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $e_i$ 、 $h_i$  均为火电厂成本系数;  $N_g$  为火电厂数量;  $P_t^{gi}$  为火电厂  $i$  在  $t$  时刻的出力;  $P_{\min}^{gi}$  为火电厂  $i$  的出力下限;  $T$  为调度周期。

2) 各电厂的运行维护费用

$$C_m = \sum_{t=1}^{24} (C_{hp} \sum_{j=1}^{N_h} P_t^{bj} + C_{wt} P_t^{WT} + C_{pv} P_t^{PV}) \Delta t \quad (3)$$

式中:  $C_{hp}$ 、 $C_{wt}$ 、 $C_{pv}$  分别代表梯级水电、风电集群、光伏集群的运维成本系数, 水电运维成本系数取 0.01 元/kWh<sup>[32]</sup>, 新能源机组考虑 0.05 元/kWh<sup>[33]</sup>;  $N_h$  为水电厂数量;  $P_t^{bj}$ 、 $P_t^{WT}$  和  $P_t^{PV}$  分别代表水电厂  $j$ 、风电集群和光伏集群在  $t$  时刻的出力。

3) 污染物排放惩罚成本

污染物一般考虑火电厂排放的  $NO_x$  和  $SO_2$  等气体, 其惩罚成本可表示为火电厂输出功率的二次函数和指数函数之和<sup>[34]</sup>, 如式(4)所示。

$$C_{SO_2} = q_g \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} a_{i0} + a_{i1} P_t^{gi} + a_{i2} (P_t^{gi})^2 + a_{i3} \exp(a_{i4} P_t^{gi}) \quad (4)$$

式中:  $a_{i0}$ 、 $a_{i1}$ 、 $a_{i2}$ 、 $a_{i3}$ 、 $a_{i4}$  均为第  $i$  个火电厂的排放系数;  $q_g$  为惩罚成本系数, 一般取 0.63 元/kg<sup>[10]</sup>。

### 1.2 目标函数 2

梯级水电平抑系统净负荷波动的效果用平抑后的余负荷方差表示, 如式(5)所示。

$$\min f_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t^{\Delta L} - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t^{\Delta L})^2 \quad (5)$$

$$P_{\text{net},t} = P_t^L - P_t^{WT} - P_t^{PV} \quad (6)$$

$$P_t^{\Delta L} = P_{\text{net},t} - \sum_{j=1}^{N_h} P_t^{bj} \quad (7)$$

式中,  $P_t^L$ 、 $P_{\text{net},t}$  和  $P_t^{\Delta L}$  分别代表  $t$  时刻系统负荷、净负荷和余负荷功率。

### 1.3 约束条件

1) 负荷功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_t^{gi} + \sum_{j=1}^{N_h} P_t^{bj} + P_t^{WT} + P_t^{PV} = P_t^L \quad (8)$$

2) 火电厂爬坡约束、上下限约束

$$\begin{aligned} P_{\min}^{gi} &\leq P_t^{gi} \leq P_{\max}^{gi} \\ |P_t^{gi} - P_{t-1}^{gi}| &\leq \Delta P_{\max}^{gi} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\Delta P_{\max}^{gi}$  代表火电厂  $i$  的最大爬坡出力, 一般取额定出力的 15%~30%。

3) 梯级水电出力约束

$$P_{t,\min}^{bj} \leq P_t^{bj} \leq P_{t,\max}^{bj} \quad (10)$$

式中,  $P_{t,\max}^{bj}$ 、 $P_{t,\min}^{bj}$  分别为水电厂  $j$  在  $t$  时刻的出力上下限。

4) 水电出力特性约束<sup>[34]</sup>

$$P_t^{bj} = \left( C_{1j} (V_t^j)^2 + C_{2j} (Q_t^j)^2 + C_{3j} V_t^j Q_t^j + C_{4j} V_t^j + C_{5j} Q_t^j + C_{6j} \right) \quad (11)$$

式中:  $C_{1j} - C_{6j}$  为水电厂  $j$  的出力系数;  $V_t^j$  和  $Q_t^j$  分别为水电厂  $j$  在  $t$  时刻的库容和流量。

5) 梯级水电流量库容约束

$$\begin{cases} Q_{\min}^j \leq Q_t^j \leq Q_{\max}^j \\ V_{\min}^j \leq V_t^j \leq V_{\max}^j \\ V_t^j = V_{t-1}^j + (I_t^j + Q_t^{j-1} - Q_t^j - S_t^j) \Delta t \\ V_0^j = V_{\min}^j \\ V_T^j = V_{\text{end}}^j \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $V_{\max}^j$  和  $V_{\min}^j$  分别为水电厂  $j$  的库容上下限;  $V_{\min}^j$  和  $V_{\text{end}}^j$  分别为水电厂  $j$  的初始库容和终库容;  $Q_{\max}^j$  和  $Q_{\min}^j$  分别为水电厂  $j$  的流量上下限;  $S_t^j$  为水电厂  $j$  在  $t$  时刻的溢水量(当超过最大库容时, 产生溢水);  $I_t^j$  为水电厂  $j$  在  $t$  时刻的入库流量。

## 2 NSGA-II 算法原理及其改进策略

### 2.1 NSGA-II 算法基本思想

NSGA-II 算法的一般过程为: 首先随机生成一个包含  $N$  个个体的种群, 即父代种群, 并对父代种群中的个体进行非支配排序; 然后计算个体拥挤度, 由个体拥挤度大小决定所在层级, 采用选择算子选出适当的个体放入交配池中, 对池中的个体进行交叉、变异等操作产生下一代种群; 最后, 使用精英策略, 按设定比例排除不达标的个体, 让优秀的个体进入下一代优化, 由此通过多次迭代来获得最终的 Pareto 前沿。

### 2.2 NSGA-II 算法改进策略

1) 自适应比例因子

NSGA-II 算法的选择机制为联赛选择法, 在该规则中, 判定个体优劣的指标是非支配等级和拥挤度距离。在同一非支配层中, 个体  $n$  (除两个端点外) 的拥挤度仅由前后相邻两个个体目标函数值的差值决定, 导致种群多样性变差。为了减少重复个体数量并增加种群的多样性, 本文对选择策略中的比例因子进行了改进, 规则如式(13)和式(14)所示。

$$C_m = N_m \cdot \xi_m, m=1,2,L, D_{\max} \quad (13)$$

$$\xi_m = z_m + \frac{k}{k_{\max}(x_m - z_m)} \quad (14)$$

式中:  $C_m$  为从所选取的种群中第  $m$  个非支配层里取得的个体数目;  $N_m$  为第  $m$  个非支配层的个体数量;  $\xi_m$  为比例因子;  $D_{\max}$  为非支配层的数目;  $z_m$ 、 $x_m$  为变量参数, 取值范围为[0.5, 1], 且  $z_m < x_m$ ;  $k$  为迭代次数;  $k_{\max}$  为最大迭代次数。

需要说明的是,  $z_m$ 、 $x_m$  只与  $m$  有关, 其初始值设置为  $z_m = 0.5$ ,  $x_m = 1$ , 随着  $m$  的增加,  $z_m$  和  $x_m$  均以 0.01 的间隔减小。比例因子  $\xi_m$  是由  $m$  和  $k$  共同决定的动态变量。从非支配层分层排序来看, 排序越靠后的非支配层含有的优势个体越少, 而  $\xi_m$  是随着  $m$  的增大而减小的, 这样可有效减少劣势个体的数量。

### 2) 正态分布交叉算子

传统的 NSGA-II 一般采用模拟二进制交叉算子 (SBX) 生成子代, 因其搜索范围有限, 易产生局部最优, 并导致进化过程存在不稳定性。针对传统 NSGA-II 的不足, 本文在交叉过程中引入正态分布交叉算子 (NDX), 可以有效增强算法的空间搜索能力, 并进一步提高收敛速度, 降低计算成本。假定父代种群为  $P_1$ 、 $P_2$ , 子代种群为  $Q_1$ 、 $Q_2$ , 对于个体  $i$ , 利用 NDX 交叉生成子代的过程如下。

产生一个随机数  $r \in (0,1]$ , 当  $r \leq 0.5$  时:

$$\begin{cases} Q_{1,i} = \frac{P_{1,i} + P_{2,i}}{2} + \frac{1.481(P_{1,i} - P_{2,i})|N(0,1)|}{2} \\ Q_{2,i} = \frac{P_{1,i} + P_{2,i}}{2} - \frac{1.481(P_{1,i} - P_{2,i})|N(0,1)|}{2} \end{cases} \quad (15)$$

当  $r > 0.5$  时:

$$\begin{cases} Q_{1,i} = \frac{P_{1,i} + P_{2,i}}{2} - \frac{1.481(P_{1,i} - P_{2,i})|N(0,1)|}{2} \\ Q_{2,i} = \frac{P_{1,i} + P_{2,i}}{2} + \frac{1.481(P_{1,i} - P_{2,i})|N(0,1)|}{2} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $N(0,1)$  为正态分布随机变量。

## 3 改进的 NSGA-II 算法在本调度问题中的求解流程

### 3.1 算法性能指标

为了比较不同算法的性能, 引入空间度量指标来衡量算法的非支配解分布程度, 其数学公式可以表示为<sup>[35]</sup>

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |d_{\text{mean}} - d_i|}{(N-1) \cdot d_{\text{mean}}} \quad (17)$$

式中:  $d_i$  代表非支配解集中相邻个体之间的欧式距离;  $d_{\text{mean}}$  代表欧氏距离的平均值;  $N$  代表非劣解集中的个体数。如果指标  $S$  越小, 则表示非劣解集分布越均匀。

### 3.2 改进的 NSGA-II 算法求解流程

采用改进的 NSGA-II 算法求解本文优化模型的流程如图 1 所示。需要补充说明的是, 在获得 Pareto 非劣解集后, 可根据模糊隶属度函数挑选折中解<sup>[30]</sup>。隶属度值可反映决策者对各优化目标的满意程度, 然后加权各目标函数的隶属度值可求取模型折中解。加权系数根据决策者偏好进行设置, 包括目标函数 1 的权重  $\lambda_1$  和目标函数 2 的权重  $\lambda_2$ 。

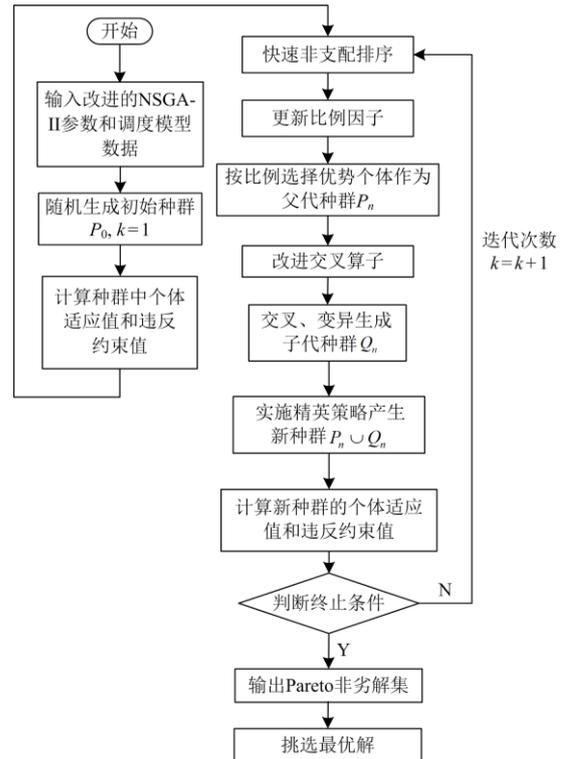


图 1 利用改进的 NSGA-II 求解本调度模型的流程图

Fig. 1 Flow chart for solving the proposed model based on improved NSGA-II

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数

仿真算例是基于梯级水电(含 3 个水电站)、2 个火电厂、1 个风电集群、1 个光伏集群的联合发电系统, 其中, 各水电站装机容量均为 100 MW; 火电厂总装机容量为 600 MW; 风电集群总装机容量为 200 MW, 光伏集群总装机容量为 120 MW。其中, 火电厂、梯级水电和负荷功率的基础数据来源于文献[34], 火、水电厂的详细参数分别如表 1 和表 2 所示, 火电厂 1 和火电厂 2 的出力范围分别为 [20, 200] MW 和 [40, 400] MW。

表 1 火电厂的成本系数

Table 1 Cost coefficients of thermal power plants

燃料系数/(元/MW)	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$	$e_i$	$h_i$
火电厂 1	100	2.45	0.0012	160	0.038
火电厂 2	120	2.32	0.001	180	0.037
排放系数/(吨/MW)	$a_{i0}$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
火电厂 1	60	-1.355	0.0105	0.4968	0.019 25
火电厂 2	45	-0.6	0.008	0.486	0.016 94

表 2 梯级水电出力系数及流量库容约束

Table 2 Output coefficients and reservoir capacity constraints of cascade hydropower plants

出力系数	$C_{1j}$	$C_{2j}$	$C_{3j}$	$C_{4j}$	$C_{5j}$	$C_{6j}$
水电站 1	-0.0042	-0.42	0.03	0.9	10	-50
水电站 2	-0.004	-0.3	0.015	1.14	9.5	-70
水电站 3	-0.0016	-0.3	0.014	0.55	5.5	-40
流量库容约束/ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	$V_{\text{ini}}$	$V_{\text{end}}$	$V_{\min}$	$V_{\max}$
水电站 1	5	15	100	100	80	150
水电站 2	5	16	80	70	60	120
水电站 3	5	16	170	150	100	240

各水电站的入库流量曲线如图 2 所示, 负荷功率如图 3 所示, 风光新能源预测出力如图 4 所示。设定调度周期为 24 h, 时间间隔为 1 h, 利用改进的 NSGA-II 算法对优化模型进行编程并求解, 设定种群数量为 100, 最大迭代次数为 10 000 次, 交叉率为 0.9, 变异率 0.1。在 Windows10 系统中, 利用 Matlab2016a 平台编制仿真程序, 仿真计算机处理器为 Intel core i7-6500U, 内存为 8 GB。

### 4.2 优化结果分析

#### 4.2.1 梯级水电对于新能源入网后平抑效果分析

场景 1: 风光新能源均入网;

场景 2: 仅考虑风电入网。

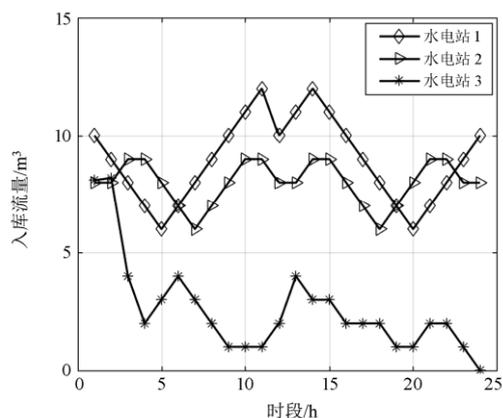


图 2 各水电站的入库流量曲线

Fig. 2 Reservoir inflows of the hydropower plants

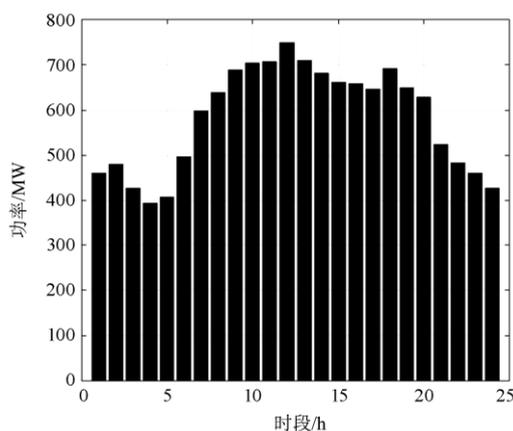


图 3 负荷功率柱状图

Fig. 3 Bar charts of load power

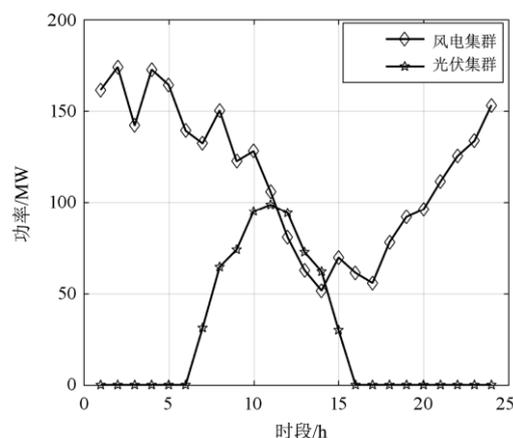


图 4 风电和光伏集群预测出力曲线图

Fig. 4 Predictive output curves of wind power and PV cluster

图 5 和图 6 分别为在场景 1 和场景 2 下求解的 Pareto 前沿, 从 Pareto 解集的分布情况看, 场景 1

下两目标值分布均比场景 2 更优，这是由于场景 1 中光伏发电能够给风电的波动提供一定的补偿，同时在负荷不变的情况下，光伏发电的投入能够减轻水、火电厂供电的压力。

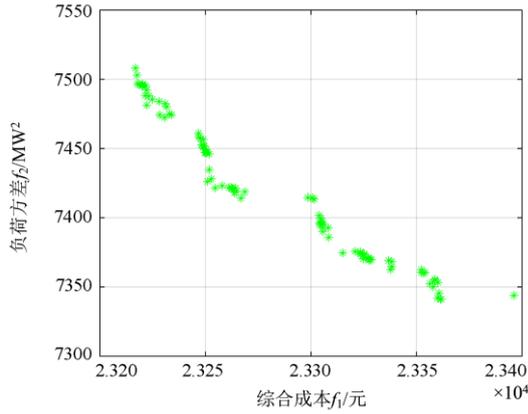


图 5 场景 1 下求解的 Pareto 前沿  
Fig. 5 Pareto fronts of scenario 1

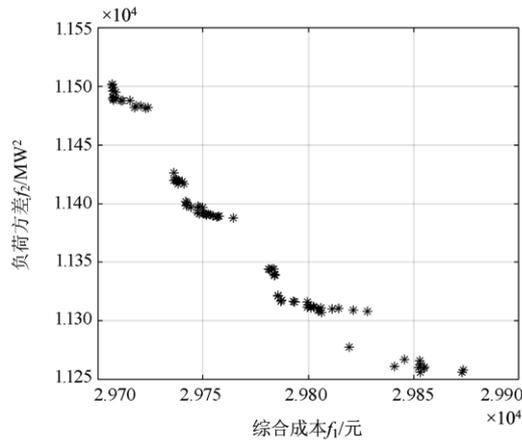


图 6 场景 2 下求解的 Pareto 前沿  
Fig. 6 Pareto fronts of scenario 2

表 3 给出了各场景下水电站参与调节前后的负荷峰谷差与负荷波动方差，图 7 为各场景下梯级水电对新能源接入后的波动平抑效果曲线。

从表 3 和图 7 的仿真结果可以看出：在场景 1 中，风光新能源入网后拉大了负荷峰谷差，负荷波动方差一度增加至 14 383 MW<sup>2</sup>，峰谷差升至 393.2 MW；通过梯级水电的平抑控制，负荷波动方差降至 7421 MW<sup>2</sup>，负荷波动减少了将近 50%，峰谷差降至 309.75 MW，平抑效果明显。在场景 2 中，在缺乏光伏补偿的情况下，净负荷波动方差高达 18 352 MW<sup>2</sup>，通过梯级水电的调节，负荷波动方差降至 11 316 MW<sup>2</sup>，峰谷差降至 347.44 MW，这表明梯级水电对于仅有风电入网的系统也能发挥较好的

平抑作用。综上，通过两个场景的仿真结果足以说明梯级水电可作为平抑新能源波动的有效途径。

表 3 新能源入网和梯级水电调节前后的负荷特性对比

Table 3 Comparison of load characteristics before and after new energy access and cascade hydropower regulation

场景 1	原始负荷	新能源接入	梯级水电参与调节后
峰谷差/MW	355.64	393.2	309.75
负荷波动方差/MW <sup>2</sup>	10 688	14 383	7421
场景 2	原始负荷	仅风电接入	梯级水电参与调节后
峰谷差/MW	355.64	425.27	347.44
负荷波动方差/MW <sup>2</sup>	10 688	18 352	11 316

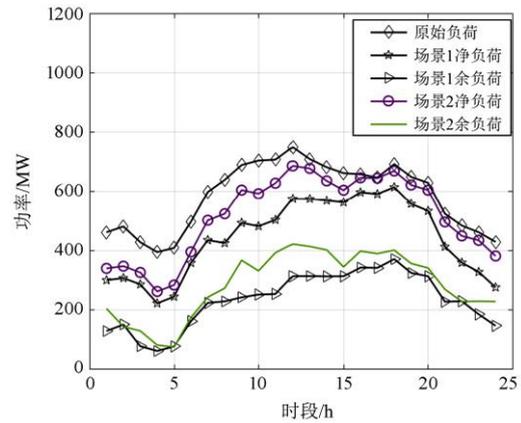


图 7 梯级水电站对新能源接入后的负荷波动抑制效果  
Fig. 7 Load fluctuation suppression by the regulation of the cascade hydropower stations after new energy access

#### 4.2.2 权重系数对于最优解的影响分析

表 4 以场景 1 为例，给出了各种典型的权重系数下的 Pareto 最优解和最大的模糊隶属度值。

表 4 不同权重系数下的各目标函数值

Table 4 Values of each objective function under different weight coefficients

权重系数	目标函数	目标函数	最大模糊隶属度函数值
	$f_1/\text{元}$	$f_2/\text{MW}^2$	
$\lambda_1=0.8, \lambda_2=0.2$	23 218	7496.5	0.8085
$\lambda_1=0.7, \lambda_2=0.3$	23 222	7480	0.726 79
$\lambda_1=0.6, \lambda_2=0.4$	23 251	7425.8	0.681 21
$\lambda_1=0.5, \lambda_2=0.5$	23 254.8	7421.3	0.653 21
$\lambda_1=0.4, \lambda_2=0.6$	23 360	7341	0.678
$\lambda_1=0.3, \lambda_2=0.7$	23 362	7340	0.757 42
$\lambda_1=0.2, \lambda_2=0.8$	23 363	7339	0.838 16

表 4 中，随着权重系数的变化，最优解对应的目标函数值也随之变化。权重系数取决于用户的偏好，若系统要求较好的经济性，可以适当增大  $\lambda_1$  值；反之，对于稳定性和峰谷差性能较高的系统，可以

适当增加  $\lambda_2$  的权重。本文其他算例暂取等权重。

以场景 1 为例, 利用改进的 NSGA-II 算法获得的折中解对应的详细数据如图 8 所示, 包括大规模新能源接入下的梯级水电、各火电厂每小时发电计划。从图 8 中各发电系统的调度出力计划来看, 清洁能源出力占据主导地位, 通过优化联合发电系统的综合成本和负荷波动方差, 梯级水电在满足库容和流量的范围内最大限度平抑了新能源接入后的负荷波动, 有效发挥了调节的潜力。

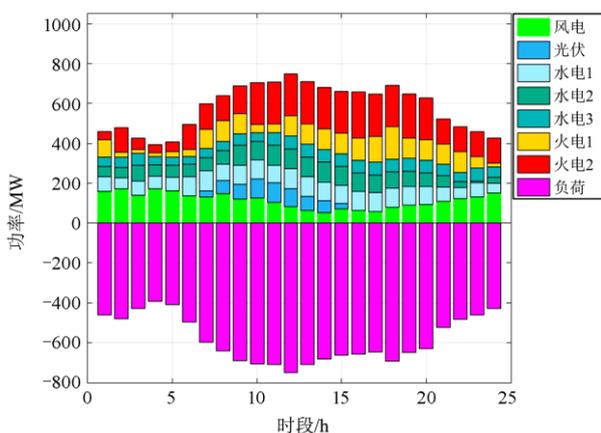


图 8 场景 1 下折中解对应的各发电厂出力柱状图

Fig. 8 Outputs of each power plant corresponding to the compromise solution of scenario 1

#### 4.2.3 改进 NSGA-II 算法的有效性

为了体现改进 NSGA-II 算法在求解本优化问题的优越性, 将场景 1 的计算结果与 NSGA、NSGA-II 的仿真结果进行了对比, 各算法获得的 Pareto 前沿如图 9 所示。相对而言, 利用改进 NSGA-II 算法获得的解集分布更加均匀, 且解的质量更高, 在相同的综合成本或污染物排放量的情况下, 利用改进 NSGA-II 算法获得的 Pareto 解集相对更优。

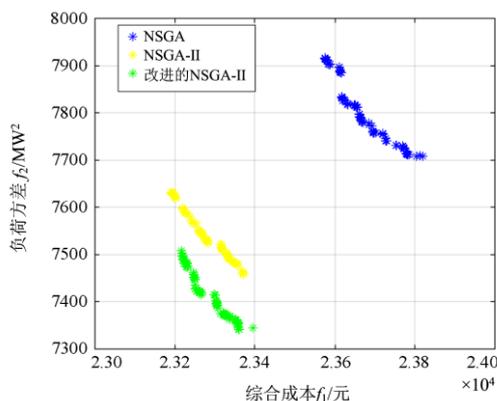


图 9 各算法下的 Pareto 前沿对比图

Fig. 9 Comparison of Pareto fronts obtained by each algorithm

表 5 为各算法下非劣解集的空间度量值, 与其他算法相比较, 正态分布交叉算子的引入能够有效增强算法的空间搜索能力, 且 Pareto 解集的空间分布更加均匀, 故改进的 NSGA-II 算法可以获得更优的性能指标。

表 6 中列出了各种算法下的折中解, 通过对比发现, 改进的 NSGA-II 算法的折中解明显支配其他两种算法的解; 此外, 从算法执行时间来看, 由于改进的 NSGA-II 算法中引入了正态分布交叉算子, 其收敛速度相对更快。综上所述, 改进的 NSGA-II 算法求解结果比其他算法更优。

表 5 各算法下 Pareto 解集的空间度量

Table 5 Spacing metric values of Pareto solution set of different algorithms

改进的 NSGA-II	NSGA-II	NSGA
0.538 63	0.596 12	0.670 46

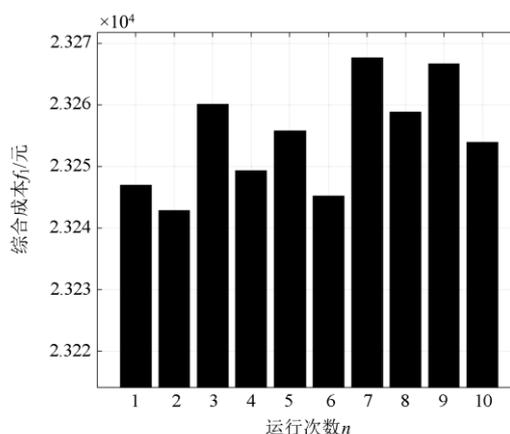
表 6 利用各算法求得的折中解对比

Table 6 Compromise solutions obtained by each algorithm

算法	综合成本 $f_1$ /元	负荷方差 $f_2$ /MW <sup>2</sup>	运行时间/s	最大模糊 隶属度函数值
NSGA	23 783	7711.4	20.26	0.8192
NSGA-II	23 372	7457.3	17.98	0.800 46
改进的 NSGA-II	23 254.8	7421.3	16.27	0.653 21

为了检验改进的 NSGA-II 算法在求解联合系统多目标优化调度模型的计算稳定性, 本文对该算法执行了 10 次独立计算, 统计每次计算的折中解分布如图 10 所示。

图 10 中, 两目标函数最大值对应综合成本为 23 268 元、负荷方差为 7438.8 MW<sup>2</sup>; 最小值对应综合成本为 23 243 元、负荷方差为 7401.6 MW<sup>2</sup>; 平均



(a) 目标函数值 1

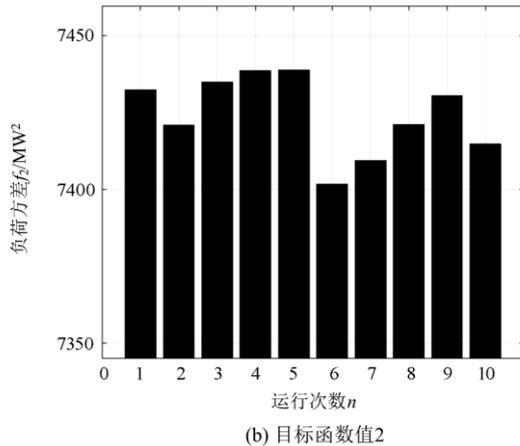


图 10 改进 NSGA-II 10 次运行的折中解对应的各目标值  
Fig. 10 Results of compromise solution for ten-run based on improved NSGA-II

值对应综合成本为 23 255 元、负荷方差为 7424.2  $MW^2$ 。10 次运行的两目标函数均方差值分别为 8.6528 和 12.841，这显示了改进的 NSGA-II 算法具有很强的计算稳定性。

## 5 结论

针对能源转型背景下系统面临的挑战和现有多能发电系统调度存在的局限性，本文提出了面向高比例新能源接入后的梯级水电与传统火电联合优化调度模型，并利用改进的 NSGA-II 算法求解，通过理论和算例分析得到如下结论：

- 1) 本调度模型有效地平抑了新能源入网造成的负荷波动问题，并兼顾了火电机组的综合效益；
- 2) 在目标函数中考虑了火电机组污染物排放成本，使火电机组的出力弱化，在兼顾负荷波动平抑效果的前提下，尽可能最大化梯级水电的出力，有利于实现系统向清洁能源为主导的电源过渡；
- 3) 通过比较不同权重系数下的目标函数值，可给用户提供的目标函数偏好的选择依据；
- 4) 通过采用自适应比例因子和正态分布交叉算子，改进的 NSGA-II 算法在 Pareto 前沿、空间度量指标和算法稳定性上均能达到最优。

当各电厂分属于不同的利益主体时，利用梯级水电去平抑风光入网波动时，新能源集团需要考虑给水电集团一定的补偿，补偿费用的大小涉及各利益主体之间的博弈。后续工作将继续开展此类问题的研究。

## 参考文献

[1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国

电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.

LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

[3] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36.

CHENG Chuntian. Function remodeling of hydropower systems for carbon neutral and its key problems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36.

[4] 钟儒鸿, 程春田, 廖胜利, 等. 兼顾多电网调峰与水电消纳的跨流域梯级水电站调度方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 114-122.

ZHONG Ruhong, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Inter-basin scheduling method of cascaded hydropower plants considering multi-grid peak shaving and hydropower accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 114-122.

[5] 魏明奎, 蔡绍荣, 江粟. 高水电比重系统中梯级水电群与风光电站协调调峰优化运行策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 199-208.

WEI Mingkui, CAI Shaorong, JIANG Li. Peak-shaving co-optimization strategies of cascaded hydropower and wind-photovoltaic generation in systems with high penetration of hydropower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 199-208.

[6] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.

ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[7] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.

XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its

- practice in Northwest China[J]. *Electric Power*, 2021, 54(11): 19-28.
- [8] 罗庆, 张新燕, 罗晨, 等. 新能源发电中储能综合利用的优化评估[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 51-55, 62.  
LUO Qing, ZHANG Xinyan, LUO Chen, et al. Optimal evaluation of energy storage comprehensive utilization in new energy generation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 51-55, 62.
- [9] WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Hydro-thermal-wind-photovoltaic coordinated operation considering the comprehensive utilization of reservoirs[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198: 1-15.
- [10] 张国斌, 陈玥, 张佳辉, 等. 风-光-水-火-抽蓄联合发电系统日前优化调度研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 79-85.  
ZHANG Guobin, CHEN Yue, ZHANG Jiahui, et al. Research on optimization of day-ahead dispatching of wind power-photovoltaic-hydropower-thermal power-pumped storage combined power generation system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(8): 79-85.
- [11] AN Y, ZHAO Z, WANG S, et al. Coordinative optimization of hydro-photovoltaic-wind-battery complementary power stations[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(2): 410-418.
- [12] XIA S, DING Z, DU T, et al. Multitime scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage, and batteries[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2227-2237.
- [13] 邵尤国, 赵洁, 刘涤尘, 等. 考虑核电调峰的风电-核电协调优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 1018-1029.  
SHAO Youguo, ZHAO Jie, LIU Dichen, et al. Coordinated optimal dispatch of wind-nuclear power considering peak load shaving of nuclear power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(4): 1018-1029.
- [14] WANG Y M, ZHAO M Z, CHANG J X, et al. Study on the combined operation of a hydro-thermal-wind hybrid power system based on hydro-wind power compensating principles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 194: 94-111.
- [15] 苏康博, 杨洪明, 余千, 等. 考虑多类型水电协调的风光电站容量优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 80-88.  
SU Kangbo, YANG Hongming, YU Qian, et al. Optimal capacity configuration method of wind-solar power station considering the coordination of multi-type hydropower[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 80-88.
- [16] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5668-5678, 5924.  
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5668-5678, 5924.
- [17] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 214-223.  
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 214-223.
- [18] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1): 21-34.
- [19] 苏承国, 王沛霖, 武新宇, 等. 考虑机组组合的梯级水电站短期调峰 MILP 模型[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1883-1891.  
SU Chengguo, WANG Peilin, WU Xinyu, et al. A compact MILP model for short-term peak shaving of cascaded hydropower plants considering unit commitment[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1883-1891.
- [20] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(6): 1-7.  
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(6): 1-7.
- [21] WU X, CAO W, WANG D, et al. Multi objective optimization based on SPEA for the microgrid energy dispatch[C] // 37th Chinese Control Conference (CCC), July 25-27, 2018, Wuhan, China: 7543-7548.
- [22] 陈天, 蔡泽祥, 谢鹏, 等. 基于改进微分进化算法的风光互补系统发电容量优化配置[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(3): 22-28.  
CHEN Tian, CAI Zexiang, XIE Peng, et al. Capacity optimization of wind/solar hybrid power generation system based on improved differential evolution algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and*

- Technology, 2017, 32(3): 22-28.
- [23] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 116-124.  
LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 116-124.
- [24] 贡保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 123-130.  
YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 123-130.
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [26] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [27] 谭碧飞, 陈皓勇, 梁子鹏, 等. 基于协同 NSGA-II 的微电网随机多目标经济调度[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3130-3139.  
TAN Bifei, CHEN Haoyong, LIANG Zipeng, et al. Stochastic multi-objective economic dispatch of micro-grid based on ConNSGA-II[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3130-3139.
- [28] 杜先波, 陶苏朦, 刘述波, 等. 综合能源系统日前-日内多目标优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 109-117.  
DU Xianbo, TAO Sumeng, LIU Shubo, et al. Day-ahead and intraday optimal control strategies of integrated energy system considering multiple objectives[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 109-117.
- [29] 蒋猛, 黄宇, 廖伟涵, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的电-气-热综合能源系统多目标优化[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 131-136.  
JIANG Meng, HUANG Yu, LIAO Weihang, et al. Multi-objective optimization of electricity-gas-heat integrated energy system based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 131-136.
- [30] 盛万兴, 叶学顺, 刘科研, 等. 基于 NSGA-II 算法的分布式电源与微电网分组优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4655-4662.  
SHENG Wanxing, YE Xueshun, LIU Keyan, et al. Optimal allocation between distributed generations and microgrid based on NSGA-II algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4655-4662.
- [31] 张福民, 崔海波, 李占凯, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 24-31.  
ZHANG Fumin, CUI Haibo, LI Zhankai, et al. Interactive multi-objective optimization of microgrid based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 24-31.
- [32] 邱旺盛. 考虑风电不确定性的风-水-储联合优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
QIU Wangsheng. Research on joint wind-water-storage optimization schedulings considering wind power uncertainty[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [33] 赵传, 戴朝华, 袁爽, 等. 考虑风火电经济社会效益的风电装机规划多目标优化方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1125-1132.  
ZHAO Chuan, DAI Chaohua, YUAN Shuang, et al. Multi-objective optimization of wind power planning considering economy-social benefit of wind power and thermal power[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(4): 1125-1132.
- [34] BASU M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multi-objective short-term hydrothermal scheduling[J]. Electrical Power System Research, 2004, 69(2): 277-285.
- [35] TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, AZARKISH M, SADEGHNEJAD-BARKOUSARAIE A. A new hybrid multi-objective Pareto archive PSO algorithm for a bi-objective job shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 10812-10821.

收稿日期: 2021-10-14; 修回日期: 2021-11-16

作者简介:

李飞(1986—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为智能电网优化运行与控制、梯级水电站优化调度; E-mail: 97001455@qq.com

李咸善(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网运行与控制、梯级水电站优化调度、水电站仿真与控制。E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

(编辑 周金梅)