DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0397 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-08

考虑碳交易的含风光配电网储能优化配置

闫群民[1],孟珉歆[1],董新洲[1,2],马永翔[2]

(1. 陕西理工大学电气工程学院,陕西 汉中 723001; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: 为合理地配置储能,提高含风光配电网的稳定性,促进新能源消纳,考虑含风光配电网的碳排放,构建碳交易机制模型,并建立以系统有功网损、电压偏移量以及碳交易成本最小为目标的储能优化配置模型。采用一种结合竞争学习策略和精英保留策略改进的粒子群算法对该模型进行求解,并选取最优配置方案。在IEEE33节点系统中对该模型进行仿真验证,结果表明,相较传统的多目标粒子群优化算法,改进的粒子群算法求解可以显著降低含风光配电网的有功网损,改善网络的电压分布,同时使新能源消纳能力达到最大化,验证了所提储能优化配置方案的有效性。

关键词: 粒子群算法;碳交易机制;竞争学习策略;精英保留策略

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A

Optimal configuration of energy storage in distribution network with wind and solar considering carbon trading

YAN Qunmin[1], MENG Minxin[1], DONG Xinzhou[1,2], MA Yongxiang[2]

(1. College of Electrical Engineering ,Shanxi University of Technology, Hanzhong 723001,China;
2. Department of Electrical Engineering and Applied Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to rationally allocate energy storage, improve the stability of the distribution network and promote the consumption of new energy, we consider the carbon emission of scenic distribution network, build a carbon trading mechanism model, and establish an optimal allocation model of energy storage with the objectives of minimizing active network loss, voltage offset and carbon trading cost. A particle swarm algorithm combining the improved competitive learning strategy and elite retention strategy is used to solve the model and select the optimal allocation scheme. The results show that compared with the traditional multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm, the improved particle swarm algorithm can significantly reduce the active network loss of the scenic distribution network and improve the voltage distribution of the network. The effectiveness of the energy storage optimization scheme proposed in this paper is verified.

Key words: particle swarm algorithm; carbon trading mechanism; competitive learning strategy; elite retention strategy

在“双碳”目标推动下,近年来可再生能源大量接入电力系统[1-6],风力与光伏发电在系统中的占比

收稿日期: 2024-11-27

作者简介: 闫群民(1980-),男,博士,教授,从事电力系统分析与电能质量控制研究,E-mail:yanqunm@163.com。

通信作者: 孟珉歆(1998-),女,硕士研究生,从事电力系统分析及新能源发电研究,E-mail:1239401945@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金一般面上项目(编号:62176146);陕西省教育厅专项科研计划项目(编号:23JK0360)。



本文引用格式: 闫群民,孟珉歆,董新洲,等.考虑碳交易的含风光配电网储能优化配置[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-8.

Citation: YAN Qunmin, MENG Minxin, DONG Xinzhou, et al. Optimal configuration of energy storage in distribution network with wind and solar considering carbon trading[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-8.

逐步提高。分布式风力与光伏发电接入会对电网的电能质量造成影响,合理的储能配置方案对电网的电能质量与经济效益具有一定的优化效果。

目前,储能优化配置已成为国内外研究热点。文献[7]考虑含风光配电网的消纳能力建立储能模型,并利用最优化理论求解最优解;文献[8]以电压偏移量、负荷功率波动以及储能容量为目标建立储能选址定容优化模型,并采用自适应调整的方法对传统多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法进行改进,利用最优粒子的位置影响惯性权重的取值,从而避免算法陷入局部最优解;文献[9]将传统粒子群算法与模糊理论结合,对算法进行改进,并通过对综合满意度进行排序选取最优解;文献[10]通过控制电池的充放电量延长电池使用寿命,提出一种改进的差分进化法对粒子群初期粒子进行交叉变异,以提高其整体适应度并求解模型;文献[11]引入准对立学习策略加快算法的收敛速度,并采用自适应分裂策略对粒子进行交叉变异以避免算法陷入局部最优解;文献[12]在传统的粒子群算法中引入天牛须搜索算法,利用对信息熵的排序求解该模型的最优解;文献[13]对算法中的粒子进行交叉变异以确定最优惯性权重值并求解模型。上述研究大多针对粒子群算法在寻优过程中易陷入局部最优解及后期收敛速度慢其中一项加以改进,因此算法在寻优过程中仍有局限性。

本文引入碳交易机制,建立以有功网损、电压偏差以及碳交易成本最小为目标函数的储能优化配置模型。采用改进的MOPSO算法对模型进行求解,即在初始阶段,采用竞争学习策略通过粒子间的相互学习提高整体粒子的适应度;在算法后期收敛过程中,通过精英保留策略加快算法的收敛速度。最后通过仿真对比来验证改进算法的有效性。

1 碳交易机制

政府通过颁布政策法规将各碳排放权利转化为可以交易的商品[14],碳交易过程如图1所示。首先由政府分配给企业一定额度的初始碳排放权,然后由企业根据自身盈亏选择购入或卖出碳排放量。对于系统中运行的不同类型机组,其初始碳排放配额由输出功率决定,即:

$$E_{q,k}=\sum_{k=1}^{N_{CEE}}\lambda_k P_k \tag{1}$$

式中:$E_{q,k}$为第k台机组总的碳排放分配额度;N_{CEE}为总机组数;λ_k为第k台机组单位输出的碳排放额度;P_k为第k台机组的出力。

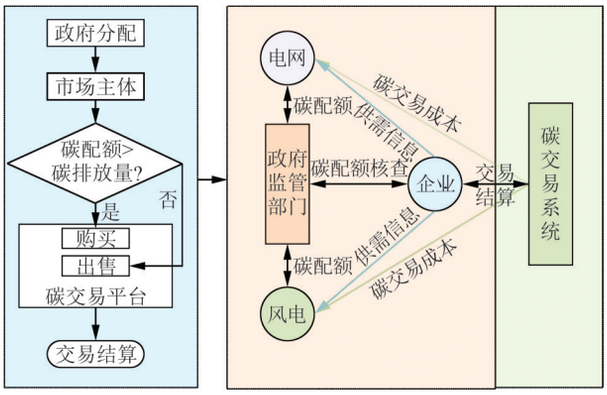


图1 碳交易过程

Fig.1 Carbon trading process

碳交易成本R_c表达式为

$$R_c=c(E-E_{q,k}) \tag{2}$$

式中:c为单位碳交易价格;E为实际的碳排放量。

系统中实际的碳排放量由火电机组碳排放量和风电机组碳排放量组成,其数学表达式为

$$\begin{cases}E_{c1}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{N_H}(\mu_h-1)P_{h,t}\\ E_{c2}=-\sum_{t=1}^{T}\sum_{w=1}^{N_W}P_{w,t}\end{cases} \tag{3}$$

式中:E_{c1}为火电机组碳交易量;E_{c2}为风电机组碳交易量;$P_{h,t}$为t时段第h台火电机组发电功率;$P_{w,t}$为t时段第w台风电机组发电功率;μ_h为火电机组h运行时的功率差异系数;T为机组运行总时段;N_H为火电机组总数;N_W为风电机组总数。

2 多目标储能规划数学模型

2.1 目标函数

储能的接入加强了电力系统维持稳定的能力,以有功网损、电压偏移量以及碳交易成本为目标函数搭建储能优化配置模型,通过控制电网的节点电压偏移量以及限制系统碳排放量提升风光消纳率。储能优化配置的多目标优化函数F可表示为

$$\min F=\min(f_1,f_2,f_3) \tag{4}$$

式中:f_1、f_2、f_3分别为有功网损、电压偏移量、碳交易成本优化函数。

储能系统具有双向功率调节作用,在电网中可以作为电源和负荷对因新能源发电引起的系统电压波动进行调节[15],f_1计算式为

$$f_1=\sum_{t=1}^{T}\sum_{ij\in n}R_{ij}(P_{ij,t}^2+Q_{ij,t}^2)/V_{i,t}^2 \tag{5}$$

式中:R_{ij}为支路ij的电阻;$P_{ij,t}$、$Q_{ij,t}$分别为t时段支

路ij的有功、无功功率；$V_{i,t}$为t时段节点i的电压；n为支路的集合。

f_2计算式为

$$f_2=\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{i=1}^{N_L}\frac{U_{i,t}-U_{ref}}{\Delta U_{i,max}}\right)^2 \tag{6}$$

式中：N_L为负荷节点数；$U_{i,t}$、U_{ref}分别为节点i的测量电压、标准参考电压；$\Delta U_{i,max}$为节点i电压的最大允许偏差，即允许范围内最大值与最小值之差。

在保证电网的技术性指标达到要求的前提下，采用第1节所述碳交易机制，以碳交易成本最小为目标函数，即：

$$f_3=R_c \tag{7}$$

2.2 约束条件

1）功率平衡约束：

$$P_{G,t}+P_{W,t}+P_{B,t}=P_{Load,t}+P_{Link,t} \tag{8}$$

式中：$P_{G,t}$、$P_{W,t}$、$P_{B,t}$分别为常规机组、风电机组、储能系统在t时段的出力；$P_{Load,t}$为系统在t时段的负荷；$P_{Link,t}$为系统在t时段对外输送的功率。

2）潮流平衡约束：

$$\begin{cases}P_{i,t}=V_{i,t}\sum\limits_{j\in J_i}V_{j,t}(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})\\ Q_{i,t}=V_{i,t}\sum\limits_{j\in J_i}V_{i,t}(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})\end{cases} \tag{9}$$

式中：$P_{i,t}$、$Q_{i,t}$分别为t时段节点i注入的有功、无功功率；$V_{i,t}$、$V_{j,t}$分别为t时段节点i、j的电压；θ_{ij}为功率因数角；G_{ij}、B_{ij}为网络参数；J_i为与i相邻节点的集合。

3）节点电压约束：

$$V_{min}\leqslant V_{i,t}\leqslant V_{max} \tag{10}$$

式中：V_{max}、V_{min}分别为节点电压的上限、下限。

4）储能容量约束：

$$\begin{cases}E_{min}\leqslant E_{s,t}\leqslant E_{max}\\ P_{Bmin}\leqslant P_{B,t}\leqslant P_{Bmax}\\ E_{s,t}=\begin{cases}(1-\varepsilon)E_{s,t-1}-\\ \quad\Delta tP_{B,t}/\beta_{dis},\quad P_{B,t}\geqslant 0\\ (1-\varepsilon)E_{s,t-1}+\\ \quad\Delta tP_{B,t}\beta_{chr},\quad P_{B,t}<0\end{cases}\\ 0.2\leqslant\gamma_{SOC,t}\leqslant 0.9\end{cases} \tag{11}$$

式中：$E_{s,t}$、$E_{s,t-1}$分别为t、$t-1$时段储能的容量；E_{max}、E_{min}分别为储能容量的上、下限；P_{Bmax}、P_{Bmin}分别为储能充放电功率的上、下限；β_{dis}、β_{chr}分别为储能放电效率、充电效率；$\gamma_{SOC,t}$为t时段储能的荷电状态（state of charge，SOC）；ε为储能自放电电流率。

3 模型求解

传统粒子群算法中粒子通过群体之间相互的信息影响以及个体的自身经验对其行为进行不断修正，最终求得最优解[16-19]。为提高初始种群多样性、促进算法收敛，本文首先引入竞争学习策略提高初始种群的适应度，然后结合精英保留策略，加快算法后期的收敛速度。

3.1 改进MOPSO

1）竞争学习策略

传统粒子群算法在寻优过程中，粒子的寻优方向始终受到全局最优的影响，导致种群的多样性受到限制，并且容易出现“早熟”现象。针对该问题，本文结合竞争学习策略对传统粒子群算法加以改进，改进后的算法粒子适应度整体更优。竞争学习策略通过种群间的相互竞争对粒子进行淘汰，避免了全局最优对寻优过程的影响[20-21]。性能相差较大的粒子竞争很有可能影响最优粒子遗传进下一代，本文通过计算初始种群中粒子适应度的平均值和标准差，将粒子划分为3组，分别称为优选组、合理组、疏远组。平均值和标准差的公式如下：

$$\bar{f}=\sum_{m=1}^{M}f_m\Big/M \tag{12}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(f_m-\bar{f})} \tag{13}$$

式中：f_m为第m个粒子的适应度值；M为粒子个数；$\bar{f}$为粒子的平均适应度；σ为粒子适应度值的标准差。

特性相近的粒子分为一组，竞争学习策略只针对合理组和疏远组中的粒子。群体中的粒子两两相互竞争，疏远组中竞争失败的粒子向合理组中的粒子学习，更新其速度和位置信息后遗传到下一代，更新公式为

$$\begin{aligned}x_{pq}^{A}(s+1)=&c_1x_{pq}^{A}(s)+c_2(x_{pq}^{A}(s)-\\&x_{pq}^{P}(s))+c_3\alpha(\bar{f}-x_{pq}^{A}(s))\end{aligned} \tag{14}$$

式中：$x_{pq}^{A}(s+1)$、$x_{pq}^{A}(s)$分别为第$s+1$、s次迭代时，疏远组中第p个粒子第q维更新后的位置；$x_{pq}^{P}(s)$为第t次迭代时，合理组中与该疏远组粒子配对的竞争目标粒子位置，即疏远组失败粒子的学习对象；α为较小正数，用于约束种群引导项的作用幅度，控制粒子的更新范围；c_1、c_2、c_3分别为优选组、合理组、疏远组的加速学习因子。

竞争学习策略中的粒子可以向种群中任何一个比其优秀的粒子学习，其种群多样性比传统粒子群丰富。

2) 精英保留策略

粒子群算法选择压力过大是其后期收敛速度慢的重要原因[22-23]。本文通过对粒子的适应度进行排序,再与适应度函数进行比较,将性能优越的粒子保留进下一代中,既可以避免遗传操作过程中最优个体的丢失,还可以引导算法的搜索方向,加快收敛。在算法初期首先确定一个最优点(x_0, y_0, r_0),定义适应度函数$f(x_0, y_0, r_0)$:

$$f(x_0,y_0,r_0)=1/F(x_0,y_0,r_0) \tag{15}$$

$$F(x_0,y_0,r_0)=\sum_{m=1}^{M}\left(\sqrt{(x_m-x_0)^2+(y_m-y_0)^2}-r_0\right)^2 \tag{16}$$

式中:$F(x_0, y_0, r_0)$为粒子到最优点的距离;(x_m, y_m)为粒子m的平面坐标;(x_0, y_0)为全局最优粒子对应的拟合圆圆心坐标;r_0为全局最优粒子对应的拟合圆半径。

本文在MOPSO算法和上述策略的基础上,结合精英保留策略,将优选组中的粒子全部保留,剔除其余2个组适应度差的粒子,使保留下的粒子进入到下一代中寻优,这样不仅可以增强算法的收敛速度,同时也可以使种群中适应度差的粒子向被直接保留下来的粒子学习,提高了粒子群整体的适应度。

3.2 算法流程

基于改进粒子群算法的储能选址定容模型求解流程如图2所示。

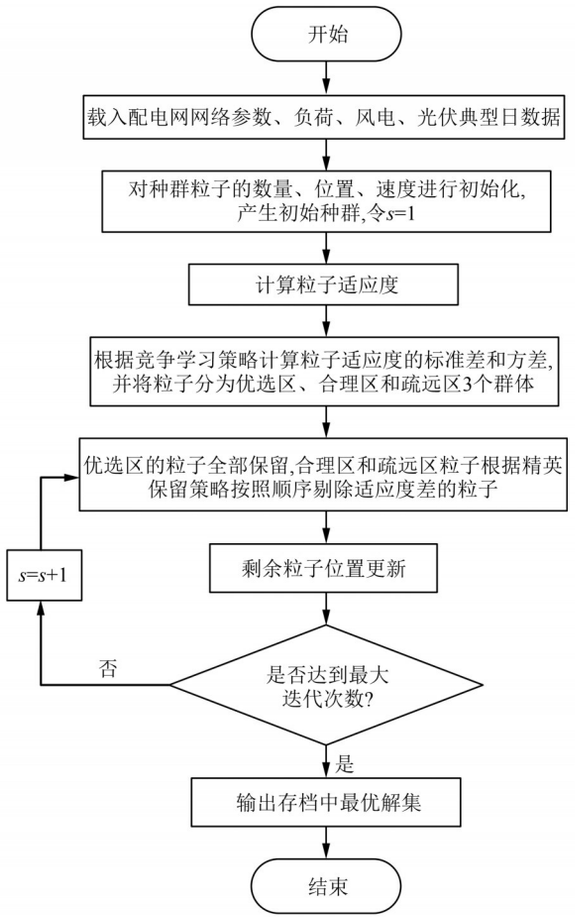


图2 分布式储能选址定容流程

Fig.2 Flow chart of distributed energy storage site selection and capacity determination

4 算例分析

以IEEE33节点配电网系统作为算例,风机接入节点9、20、25,光伏接入节点28,拓扑结构如图3所示,参数设置如表1所示。系统的额定电压和基准容量分别为12.66 kV和10 MVA[24]。本文中只考虑DG的有功出力,不考虑无功。典型日风机及光伏出力曲线和负荷曲线分别如图4、5。

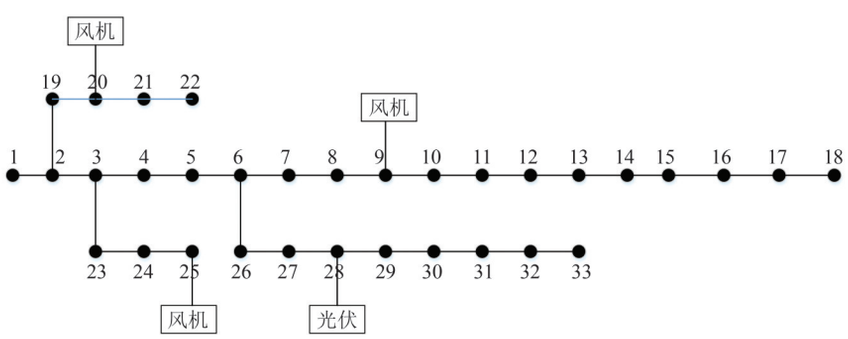


图3 改进的IEEE33节点配电网系统

Fig.3 Improved IEEE 33-node distribution network system

针对以下4种方案进行仿真,通过对比仿真结果来验证改进算法的有效性:方案1,不配置储能;方案2,配置储能,采用传统粒子群算法;方案3,配置储能,采用改进粒子群算法但不考虑碳交易机制;方案4,配置储能,采用改进粒子群算法且考虑碳交易机制。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

迭代次数	种群个数	惯性权重	SOC 范围	淘汰率/%
100	100	0.4~0.9	0.2~0.9	5

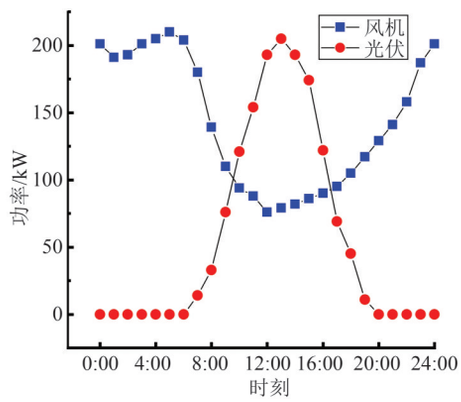


图 4 典型日风机及光伏出力曲线

Fig.4 Typical daily PV and fan output curve

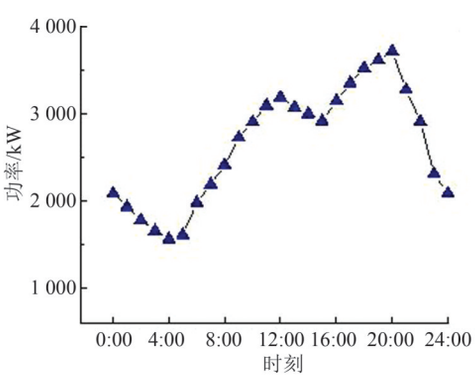


图 5 典型日负荷曲线

Fig.5 Typical daily load curve

接入系统中的储能装置不仅可以充当电源,还可以充当负荷,当居民用电量大于电力系统的发电量时,储能装置向系统输送电能,当居民用电量小于系统发电量时,储能装置作为负荷从系统中吸收电能。储能配置前后系统负荷曲线如图 6 所示。由

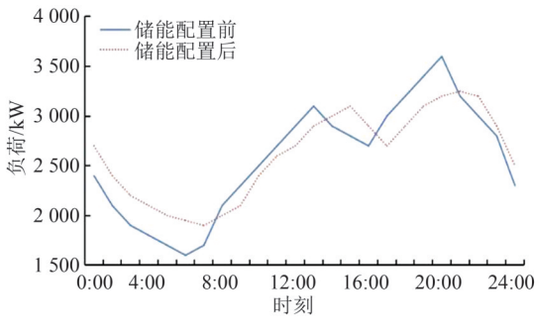


图 6 储能配置前后系统负荷曲线

Fig.6 System load curve before and after energy storage configuration

图 6 可以看出,系统在未配置储能时的峰谷差达到 1 900 kW,弃风弃光率达到 17.69%;配置优化的储能后系统的峰谷差为 1 200 kW,弃风弃光率为 9.97%。因此,储能装置的接入起到了一定的削峰填谷作用。

不同方案下的优化结果如表 2 所示。比较方案 1、2 可知,相较未配置储能,配置储能后的电压偏差量和网损分别下降 6.4% 和 9.1%,这表明储能具有很好的抑制电网中电压波动的作用。相比方案 2,方案 3 电压偏差量和网损分别下降 2.5% 和 3.2%,这表明改进算法具有更高的求解精度,可以进一步改善配电网的电压分布。

方案 1、2、3 的系统节点电压曲线如图 7 所示,通过对比可以看出,在系统中加装储能可以降低网

表 2 不同方案下的优化结果

Table 2 Optimization results in different scenarios

方案	f_1/p.u.	f_2/MW	f_3/万元	储能容量/(MW·h)(接入位置)
1	0.457 3	1.367 9	—	—
2	0.413 6	1.246 7	6	0.887 1(12)、0.690 2(20)
3	0.376 5	1.133 0	6	0.889 7(14)、0.969 2(33)
4	0.347 2	1.046 1	5	0.779 7(3)、0.927 3(7)

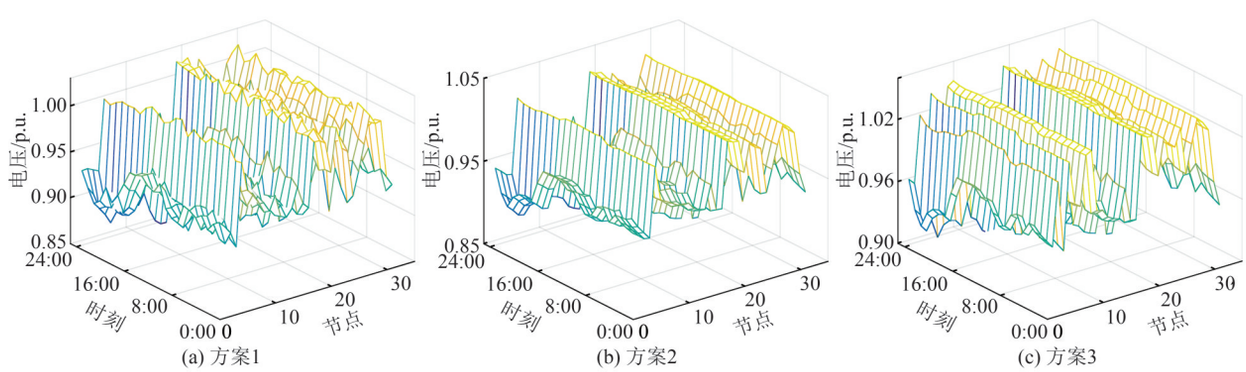


图 7 不同方案下系统节点电压曲线

Fig.7 System node voltage curves under different scenarios

络损耗、抑制电压波动、提高电压质量。

方案2与3的电压偏差、日有功网损的外部解收敛曲线分别如图8、9所示。可以看出,改进的粒子群算法比传统粒子群算法收敛速度更快。

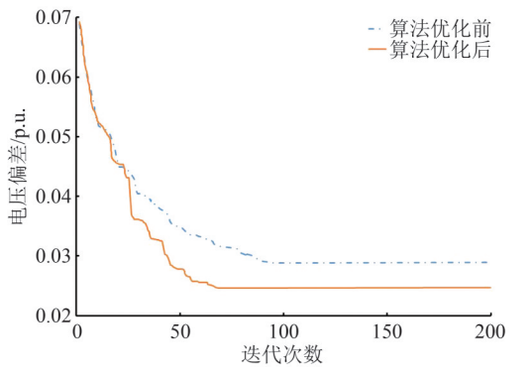


图8 电压偏差外部解收敛曲线

Fig.8 Voltage deviation external solution convergence curve

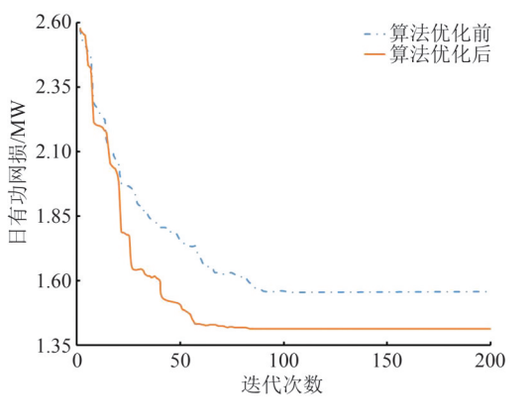


图9 日有功网损外部解收敛曲线

Fig.9 Convergence curve of the external solution of the daily active network loss

节点3、7处储能装置的充放电功率及SOC变化情况分别如图10、11所示。可以看出,储能在夜间负荷端用电量少时将电能储存起来,在白天用电高峰时将电能释放出来,有效降低了系统的弃风弃光率,提高了经济与环境效益。

方案3和4的碳排放量对比如图12所示。由图12可知,加入碳交易机制的系统碳排放量比未加入碳交易机制的系统碳排放量少,同时风电场可以通过出售碳配额来弥补运维成本。

5 结语

本文从电压偏移量、网损、碳交易成本3个方面设立目标函数,针对储能的选址定容建立优化模型,提出模型求解的改进传统粒子群优化算法,并设置4种方案进行对比,得出如下结论:

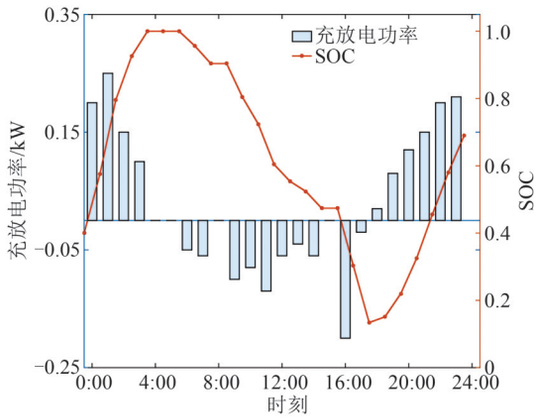


图10 节点3处储能运行策略及SOC曲线

Fig.10 3-node energy storage operation strategy and SOC curve

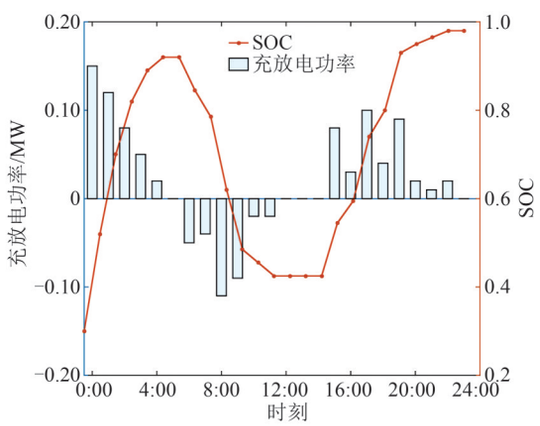


图11 节点7处储能运行策略及SOC曲线

Fig.11 Energy storage operation strategy and SOC curve at 7 nodes

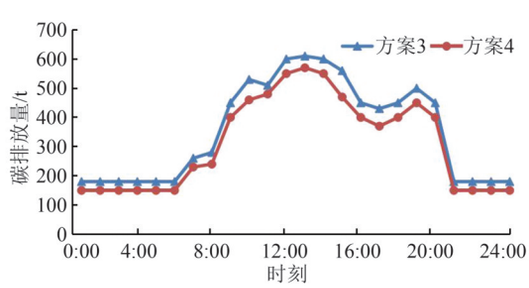


图12 碳排放量对比

Fig.12 Comparison of carbon emissions

1)通过建立以网损、电压偏差以及碳交易成本为目标函数的储能模型,将电压偏差和储能的选址相结合,有效降低了由风电出力的随机性造成的系统电压波动,提高了系统稳定性。引入碳交易机制可以有效控制系统碳排放量,提高风光消纳能力。

2)引入竞争学习策略和精英保留策略对传统MOPSO算法进行改进,一方面通过相互学习竞争扩大了粒子的初始种群范围,提高了整体适应度,

另一方面加快了算法后期的收敛速度。

参考文献：

[1] 郝婷，樊小朝，王维庆，等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(1)：101-112.
HAO Ting，FAN Xiaochao，WANG Weiqing，et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading [J]. Power System Protection and Control，2023，51(1)：101-112.

[2] 车泉辉，吴耀武，祝志刚，等. 基于碳交易的含大规模光伏发电系统复合储能优化调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(3)：76-82.
CHE Quanhui，WU Yaowu，ZHU Zhigang，et al. Carbon trading based optimal scheduling of hybrid energy storage system in power systems with large-scale photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(3)：76-82.

[3] 张笑演，王橹裕，黄蕾，等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化，2023，47(9)：34-46.
ZHANG Xiaoyan，WANG Luyu，HUANG Lei，et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(9)：34-46.

[4] 裴玮，盛鹏，孔力，等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报，2008，28(13)：152-157.
PEI Wei，SHENG Kun，KONG Li，et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE，2008，28(13)：152-157.

[5] 邵振，邹晓松，袁旭峰，等. 基于改进多目标粒子群优化算法的配电网削峰填谷优化[J]. 科学技术与工程，2020，20(10)：3984-3989.
SHAO Zhen，ZOU Xiaosong，YUAN Xufeng，et al. Optimization of peak load shifting in distribution network based on improved MOPSO algorithm[J]. Science Technology and Engineering，2020，20(10)：3984-3989.

[6] KUANG H H，SU F Q，CHANG Y R，et al. Reactive power optimization for distribution network system with wind power based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research，2022，213：108731.

[7] 谢雨龙，罗逸飚，李智威，等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4403-4412.
XIE Yulong，LUO Yiyang，LI Zhiwei，et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. High Voltage Engineering，2022，48(11)：4403-4412.

[8] 吴小刚，刘宗歧，田立亭，等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术，2014，38(12)：3405-3411.
WU Xiaogang，LIU Zongqi，TIAN Liting，et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology，2014，38(12)：3405-3411.

[9] 孙坡，张巍，曾佳斌，等. 计及碳排放和风光消纳的多目标切荷优化调度[J]. 电力科学与工程，2018，34(4)：14-20.
SUN Po，ZHANG Wei，ZENG Jiabin，et al. Multi-objective optimal dispatch with load curtailment considering carbon emission and wind-photovoltaic power accommodation[J]. Electric Power Science and Engineering，2018，34(4)：14-20.

[10] 向育鹏，卫志农，孙国强，等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术，2015，39(1)：264-270.
XIANG Yupeng，WEI Zhinong，SUN Guoqiang，et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology，2015，39(1)：264-270.

[11] 闫群民，董新洲，穆佳豪，等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(10)：11-19.
YAN Qunmin，DONG Xinzhou，MU Jiahao，et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control，2022，50(10)：11-19.

[12] 朱娟娟，段奕琳，闫群民，等. 基于BAS-IMOPSO算法的风电系统储能优化配置[J]. 电力工程技术，2023，42(2)：180-187.
ZHU Juanjuan，DUAN Yilin，YAN Qunmin，et al. Optimal allocation of energy storage in wind power system based on BAS-IMOPSO algorithm[J]. Jiangsu Electrical Engineering，2023，42(2)：180-187.

[13] 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.

[14] 冯帅, 袁至, 王维庆, 等. 碳交易背景下基于LGPG-P2G的微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 157-167.
FENG Shuai, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Optimization and configuration of microgrid capacity based on LGPG-P2G in the context of carbon trading [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(3): 157-167.

[15] 米阳, 王鹏, 邓锦, 等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 1-8.
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 1-8.

[16] 邹玧琦, 杨国华, 郑豪丰, 等. 基于改进小生境PSO算法的综合能源系统调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 47-52.
ZOU Yuqi, YANG Guohua, ZHENG Haofeng, et al. Dispatching for integrated energy system based on improved niche PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 47-52.

[17] 张伟, 黄卫民. 基于种群分区的多策略自适应多目标粒子群算法[J]. 自动化学报, 2022, 48(10): 2585-2599.
ZHANG Wei, HUANG Weimin. Multi-strategy adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm based on swarm partition[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(10): 2585-2599.

[18] 缪家森, 成丽珉, 吕宏水. 基于PSO-ELM的储能锂电池荷电状态估算[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 165-169.
MIAO Jiasen, CHENG Limin, LÜ Hongshui. Estimation of state of charge of energy storage lithium battery based on PSO-ELM[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(1): 165-169.

[19] 胡德峰, 张步涵, 姚建光. 基于改进粒子群算法的多目标最优潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 51-57.
HU Defeng, ZHANG Buhan, YAO Jianguang. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective optimal power flow[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(3): 51-57.

[20] 刘明, 董明刚, 敬超. 基于定期竞争学习的多目标粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(2): 330-335.
LIU Ming, DONG Minggang, JING Chao. Scheduled competition learning based multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(2): 330-335.

[21] 张钰, 王蕾, 周红标, 等. 基于竞争学习的粒子群优化算法设计及应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 182-189.
ZHANG Yu, WANG Lei, ZHOU Hongbiao, et al. Design and applications of particle swarm optimization based on competitive learning[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(8): 182-189.

[22] 刘健, 李京航, 柏小丽. 基于精英保留策略遗传算法的配电网无功优化[J]. 电气技术, 2015, 16(4): 35-38.
LIU Jian, LI Jinghang, BAI Xiaoli. Reactive power optimization of distribution network using genetic algorithm with elitist strategy[J]. Electrical Engineering, 2015, 16(4): 35-38.

[23] WANG F, ZHOU L D, REN H, et al. Search improvement process-chaotic optimization-particle swarm optimization-elite retention strategy and improved combined cooling-heating-power strategy based two-time scale multi-objective optimization model for stand-alone microgrid operation[J]. Energies, 2017, 10(12): 1936.

[24] 毛志宇, 蒋叶, 李培强, 等. 基于改进灰狼算法的配电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(6): 1-8.
MAO Zhiyu, JIANG Ye, LI Peiqiang, et al. Optimal configuration of energy storage in distribution network based on improved gray wolf algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(6): 1-8.