

## 考虑风光消纳和碳减排的配电网混合储能 优化配置研究\*

刘同和<sup>1</sup> 吴佳哲<sup>1</sup> 李向前<sup>1</sup> 张澜芳<sup>1</sup> 王雷<sup>1</sup> 赵晶晶<sup>2</sup> 樊濠诚<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司濮阳供电公司 濮阳 457000;

2. 上海电力大学电气工程学院 上海 200090)

**摘要:**大力发展风电、光伏等可再生能源是我国实现“双碳”目标的重要途径。风光等分布式电源(distributed generation, DG)大量接入配电网后,将储能电池作为灵活性调节资源,可提升配电网风光消纳、碳减排和运行稳定性能力。考虑碳排放强度提出了碳排放指标,建立了考虑风光消纳和碳减排的配电网混合储能(hybrid energy storage, HES)优化配置模型;并通过禁忌搜索(tabu search, TS)和改进学习因子粒子群优化算法对模型进行求解;最后,通过 IEEE-33 节点配电网系统进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。结果表明,合理配置混合储能可以有效提高配电网风光消纳能力、碳减排能力和运行稳定性。

**关键词:**分布式电源;碳减排;混合储能系统;禁忌搜索;粒子群优化算法

**中图分类号:** TN912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

## Research on optimal allocation of hybrid energy storage in distribution network considering landscape absorption and carbon emission reduction

Liu Tonghe<sup>1</sup> Wu Jiazhe<sup>1</sup> Li Xiangqian<sup>1</sup> Zhang Lanfang<sup>1</sup> Wang Lei<sup>1</sup> Zhao Jingjing<sup>2</sup> Fan Haocheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Company Puyang Power Supply Company, Puyang 457000, China;

2. College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Vigorously developing renewable energy such as wind power and photovoltaic is an important way to achieve the goal of "double carbon" in China. After a large number of distributed power sources such as wind power are connected to the distribution network, the energy storage battery is used as a flexible adjustment resource, which can improve the wind absorption, carbon emission reduction and operational stability of the distribution network. In this paper, carbon emission index is proposed considering carbon emission intensity, and HES optimization configuration model of distribution network is established considering landscape consumption and carbon emission reduction. The model is solved by tabu search (TS) and improved learning factor particle swarm optimization algorithm. Finally, through the simulation analysis of IEEE-33 node distribution system, the effectiveness of the proposed method is verified. The results show that reasonable allocation of hybrid energy storage can effectively improve the wind absorption capacity, carbon emission reduction capacity and operation stability of distribution network.

**Keywords:** distributed power supply; carbon reduction; hybrid energy storage system; tabu search; particle swarm optimization algorithm

收稿日期:2024-07-05

\* 基金项目:国家自然科学基金(52007112)项目资助

## 0 引言

为实现“碳达峰、碳中和”的广泛经济社会系统性变革,关键举措在于不断深化“双碳”目标并构建新型电力系统。这一战略建议将成为推动我绿色低碳转型的引领力量,为我国能源电力行业低碳转型指明了方向<sup>[1-3]</sup>。为提升能源利用效率、降低二氧化碳排放,实现电力系统低碳运行,构建以新能源发电为主体的新型电力系统意义重大。随着风光等新能源装机容量的快速上升,新型电力系统的安全稳定运行面临巨大挑战。随着大量风电、光伏等分布式新能源接入配电网,如何促进配电网对风光新能源的消纳能力、提升配电网碳减排能力和运行稳定性成为当前的研究热点<sup>[4]</sup>。近年来,储能技术快速发展并日渐成熟,混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)能发挥能量型储能持久性的同时实现功率型储能的快速性,在电力系统中得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。混合储能系统不但能实现电力系统复杂工况下的调峰调频、分布式电源(distribution generation, DG)平滑接入、削峰填谷等功能,还能有效促进电力系统新能源消纳能力<sup>[6-7]</sup>,因此,研究混合储能系统在配电网中的优化配置具有重要的意义。

针对储能系统在电力系统中的优化配置问题,已有诸多学者做了相关研究工作。文献[8]对不同储能研究现状进行了梳理,并对未来实现多时间尺度功率-能量型储能平衡进行了展望。文献[9-11]分析了不同类型储能技术的特点,提出了混合储能系统数学模型及其优化配置模型。文献[12-14]研究了将功率型和能量型储能相结合的混合储能系统在配电网中的优化配置方法。文献[15]研究了全钒液流电池和先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)混合储能在配电网中的优化配置,平抑了可再生能源出力波动,促进了可再生能源消纳。以上关于配电网混合储能系统的优化配置研究,有效提高了配电网新能源消纳能力,但均未考虑碳排放对配电网的影响。

在“双碳”战略目标下,节能减排成为新型电力系统发展的重要议题,因此储能优化配置研究还应考虑碳排放因素<sup>[16-17]</sup>。文献[18-20]提出了计及碳减排分摊的配电网分布式集群储能配置模型,以储能全寿命周期成本最小,碳减排收益最大为目标对各个集群进行储能配置。文献[21]将碳捕集技术加入到电力系统规划配置中,从而有效降低系统的碳排放量。文献[22]将系统碳排放量作为约束条件,通过配置和对储能系统的规划,实现了降低系统碳排放污染量的规划目标。文献[23]基于概率机会约束方法,构建了以综合成本和碳排放量最小为目标的混合储能系统配电网优化配置模型。文献[24]提出了考虑总成本最低和CO<sub>2</sub>排放限额的有源配电网DG和储能优化配置模型。综上所述,在目前的研究中关于考虑新能源消纳和碳排放因素的配电网混合储能优化配置研究还较少。

本文首先对新型配电网中多种灵活性资源和风光出

力特性开展了分析。然后,结合碳排放强度概念提出了碳排放指标,提出考虑碳排放量和风光消纳率因素的混合储能系统多目标优化模型。接着,提出了一种基于禁忌搜索(tabu search, TS)和改进学习因子的粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)对模型进行求解。最后,基于改进的IEEE 33节点系统开展算例分析,验证所提方法的有效性。

## 1 含混合储能系统的新型配电网结构

### 1.1 新型配电网结构

新型配电网结构中包含不同能源类型的各种设备,其系统结构如图1所示,包括分布式光伏发电、风力发电、电动汽车、混合储能和需求响应负荷等。本文主要研究新型配电网中混合储能系统优化配置方法。

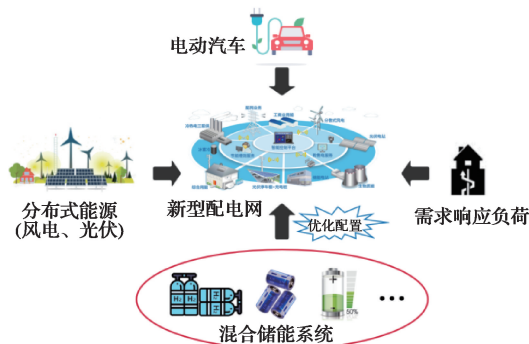


图1 含混合储能系统新型配电网结构

Fig. 1 New distribution network structure including hybrid energy storage system

### 1.2 混合储能系统

随着风电和光伏等分布式电源和电动汽车在配电网中的渗透率不断提高,对新型配电网配置合理的储能系统能有效促进新能源消纳、提高能源利用率、降低碳排放和改善电能质量。储能技术按充放电功能可划分为能量型和功率型。能量型如锂离子电池、抽水蓄能等;具有容量大、能量密度高,放电时间长的特点;功率型如超级电容、超导磁储能等,具有响应速度快、功率密度高,循环次数多的特点<sup>[8]</sup>。为兼顾功率型和能量型储能的优势,本文选取由磷酸铁锂电池-超级电容组成的混合储能系统,研究其在新型配电网优化配置方法。

## 2 混合储能系统优化配置模型

### 2.1 目标函数

在考虑含混合储能的配电网系统经济性和稳定性等目标的基础上,本文将碳排放指标和消纳度指标加入超级电容-磷酸铁锂电池混合储能优化配置的目标中。本文优化配置模型决策变量为HESS各自额定功率、额定容量,分别由 $P_{LFP}^n$ 、 $P_{SCAP}^n$ 、 $E_{LFP}$ 、 $E_{SCAP}$ 表示,由于经济性和碳排放、消纳率指标的量纲不同,如果以多目标优化的方法

求解,则会带来权重选取的主观性问题,因此,将多目标问题加权归一为单目标问题进行求解。即:

$$\min F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 + \alpha_4 F_4 + \alpha_5 F_5 \quad (1)$$

1) 综合成本目标函数

本文以 LFP-SCAP 参与配电网的综合成本最小作为配电网中混合储能系统优化配置的经济性指标:

$$\min F_1 = \min(C_{costs} - C_{benefit}) \quad (2)$$

$$C_{benefit} = C_{loss} + C_{grid} + C_{DG} \quad (3)$$

式中:  $C_{cost}$  为 HESS 总成本;  $C_{benefit}$  为 HESS 运行效益。其中,  $C_{benefit}$  考虑配电网接入 HESS 后网损减少效益  $C_{loss}$ , 减少向上级电网购电效益  $C_{grid}$  以及弃风弃光量减少的效益  $C_{DG}$ 。

$C_{cost}$  包括混合储能系统投资成本和运维成本之和,所采用的 LFP-SCAP 混合储能系统寿命为 20 年,暂不考虑回收成本。并采用各阶段的折算系数将不同成本折算为储能系统的年均综合费用:

$$C_{costs} = C_{inv} + C_{ope} + C_m \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{inv} = k_{LFP} \times (C_{LFP,P} P_{LFP}^n + C_{LFP,E} E_{LFP}) + \\ k_{SCAP} \times (C_{SCAP,P} P_{SCAP}^n + C_{SCAP,E} E_{SCAP}) \\ C_{ope} = C_{LFP,ope} E_{LFP} + C_{SCAP,ope} E_{SCAP} \\ C_m = C_{LFP,m} E_{LFP} + C_{SCAP,m} E_{SCAP} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C_{inv}$  表示混合储能系统年均投资成本,由储能系统初始购置费用折算为年均费用所得;  $C_{ope}$  表示混合储能系统年均运行成本,包括对储能系统安装调试、运行损耗及人工费用的折算;  $C_m$  表示混合储能系统年均维护成本,包括对常规检修费用和故障后维修费用的折算;  $k_{LFP}$ 、 $k_{SCAP}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的年等值投资系数;  $C_{LFP,P}$ 、 $C_{SCAP,P}$  分别为单位功率投资系数;  $C_{LFP,E}$ 、 $C_{SCAP,E}$  分别为单位容量投资系数;  $P_{LFP}^n$ 、 $P_{SCAP}^n$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的额定功率;  $E_{LFP}$ 、 $E_{SCAP}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的装机容量。  $C_{LFP,ope}$ 、 $C_{SCAP,ope}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的单位容量运行系数。  $C_{LFP,m}$ 、 $C_{SCAP,m}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的单位容量维护系数。

2) 有功网损成本目标函数

$$F_2 = C_{Loss} = k_{Loss} P_{loss} \quad (6)$$

式中:  $k_{Loss}$  为有功网损惩罚系数;  $P_{loss}$  为配电网有功网损值。

3) 电压稳定性目标函数

$$F_3 = VDI = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta U_{i,t}}{U_{i,max} - U_{i,min}} \right)^2 \quad (7)$$

式中:  $\Delta U_{i,t}$ 、 $U_{i,min}$  和  $U_{i,max}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  的电压偏差、电压上限和下限。

由于电压偏移量在一定程度上可以反映电压稳定性,引入系统电压偏差量指标(voltage deviation index, VDI),VDI 的计算是对一个周期 24 h 内各节点的电压变化进行平方求和,再进行累加。因此,VDI 的值越小,说明系统对负荷变化的响应越平稳,电压稳定性越好。

4) 碳排放量指标目标函数

DG 的接入可以有效减少配电网向主网的购电量,而主网发电需要消耗大量化石能源并产生污染气体<sup>[25]</sup>,而对储能系统的合理配置和使用有助于提高电网的灵活性和可靠性,减少对高碳排放电源的依赖,从而降低配电网的碳排放。因此本文基于碳排放强度提出碳排放量指标(carbon emissions, CES)来对所提出的优化配置模型进行评价。即:

$$F_4 = CES = \sum_{t=1}^{24} c_{emi} P_{grid,t} \quad (8)$$

式中: CES 为系统单日 24 h 内碳排放量;  $c_{emi}$  为网供电平均碳排放因子;  $P_{grid,t}$  为配电网在  $t$  时刻向上级电网的购电功率。

5) 消纳率指标目标函数

本文将一个周期 24 h 内的风光出力与系统负荷需求的比值作为风光消纳率指标(wind power and photovoltaic consumption rate, WPCR),即:

$$F_5 = WPCR = \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in wt} P_{i,t}^{wt} + \sum_{j \in pv} P_{j,t}^{pv}}{\sum_{i \in N} P_{i,t}^{load} + \sum_{m \in M} P_{m,t}^{loss}} \quad (9)$$

式中:  $P_{i,t}^{wt}$  为  $t$  时刻风电  $i$  功率输出;  $P_{j,t}^{pv}$  为  $t$  时刻光伏  $j$  功率输出;  $P_{i,t}^{load}$  为节点  $i$  负荷  $t$  时刻的功率需求;  $P_{m,t}^{loss}$  为  $t$  时刻支路  $m$  功率损耗。

## 2.2 约束条件

1) 潮流平衡约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  注入的有功和无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值;  $G_{ij}$  为  $i-j$  支路的电导;  $B_{ij}$  为  $i-j$  支路的电纳;  $\theta_{ij}$  为电压相角差,下文不再做解释。

2) 节点电压约束

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (11)$$

3) 支路容量约束

$$\text{线路 } l \text{ 的传输容量: } S_l < S_{l,max} \quad (12)$$

式中:  $S_l$  为线路  $l$  的容量值。

4) 投资成本约束

$$C_{inv}^{LFP} + C_{inv}^{SCAP} < C_{inv}^{rule} \quad (13)$$

其中:

$$C_{inv}^{LFP} = k_{LFP} \times (C_{LFP,P} P_{LFP}^n + C_{LFP,E} E_{LFP}) \quad (14)$$

$$C_{inv}^{SCAP} = k_{SCAP} \times (C_{SCAP,P} P_{SCAP}^n + C_{SCAP,E} E_{SCAP}) \quad (15)$$

式中:  $C_{inv}^{LFP}$  为储能系统中磷酸铁锂电池的投资成本;  $C_{inv}^{SCAP}$  为储能系统中超级电容的投资成本;  $C_{inv}^{rule}$  为给定投资额度。

5) 混合储能系统约束

(1) 容量约束

$$\begin{cases} E_{\min}^{E_{LFP}} \leq E_t^{E_{LFP}} \leq E_{\max}^{E_{LFP}} \\ E_{\min}^{E_{SCAP}} \leq E_t^{E_{SCAP}} \leq E_{\max}^{E_{SCAP}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $E_t^{E_{LFP}}$ 、 $E_t^{E_{SCAP}}$ 、 $E_{\max}^{E_{LFP}}$ 、 $E_{\min}^{E_{LFP}}$ 、 $E_{\max}^{E_{SCAP}}$ 、 $E_{\min}^{E_{SCAP}}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的容量及其上下限。

(2) 功率约束

混合储能系统内磷酸铁锂电池和超级电容的功率约束形式相同：

$$\begin{cases} P_s^{\min} \leq P_t^s \leq P_s^{\max} \\ P_r^{\min} \leq P_t^r \leq P_r^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_s^{\min}$ 、 $P_s^{\max}$  分别为磷酸铁锂电池或超级电容充放电功率的上下限； $P_r^{\min}$ 、 $P_r^{\max}$  分别为磷酸铁锂电池或超级电容充放电功率的上下限； $P_t^s$ 、 $P_t^r$  分别为  $t$  时刻磷酸铁锂电池或超级电容的充放电功率。

(3) 荷电状态约束

$$\begin{cases} S_{\min}^{S_{LFP}} \leq S_t^{S_{LFP}} \leq S_{\max}^{S_{LFP}} \\ S_{\min}^{S_{SCAP}} \leq S_t^{S_{SCAP}} \leq S_{\max}^{S_{SCAP}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $S_t^{S_{LFP}}$ 、 $S_t^{S_{SCAP}}$ 、 $S_{\max}^{S_{LFP}}$ 、 $S_{\min}^{S_{LFP}}$ 、 $S_{\max}^{S_{SCAP}}$ 、 $S_{\min}^{S_{SCAP}}$  分别为磷酸铁锂电池、超级电容的荷电状态及其上下限。

### 3 求解算法

#### 3.1 算法介绍

针对配电网系统的混合储能配置优化这一多目标非线性规划问题,本文引入禁忌表和禁忌准则<sup>[26]</sup>,并对 PSO 算法的惯性权重和学习因子进行动态调整,有效解决了传统算法在收敛速度、搜索精度、存在局部最优解方面存在的问题,平衡了全局搜索能力,提高了算法的性能。

惯性权重  $\omega$  在平衡全局搜索和局部搜索能力方面发挥作用,学习因子(learning factor)也是影响粒子速度更新的参数之一。因此,适当选择  $\omega$  值和设置学习因子可以提高算法性能,优化搜索能力,并减少迭代次数。本文提出了动态调整惯性权重和学习因子的方法。惯性权重的计算公式为：

$$\omega = \sin\left(\pi + \frac{g}{2g_{\max}} \times \pi\right) \quad (19)$$

式中： $g$  表示当前迭代次数； $g_{\max}$  表示当前种群迭代次数的最大值。

学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  分别代表个体自我认知和社会认知。需要设置恰当的  $c_1$ 、 $c_2$  以便于粒子进行搜寻。初期要关注个体自我认识的能力,后期则应注重个体获取社会信息的能力。本文设置如下学习因子：

$$\begin{cases} c_1 = (e_1 - e_2)g/g_{\max} + e_2 \\ c_2 = (f_1 - f_2)g/g_{\max} + f_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中： $e_1$ 、 $e_2$ 、 $f_1$ 、 $f_2$  分别为在全局搜索和局部搜索时增加群体经验项和个体经验项值的参数。

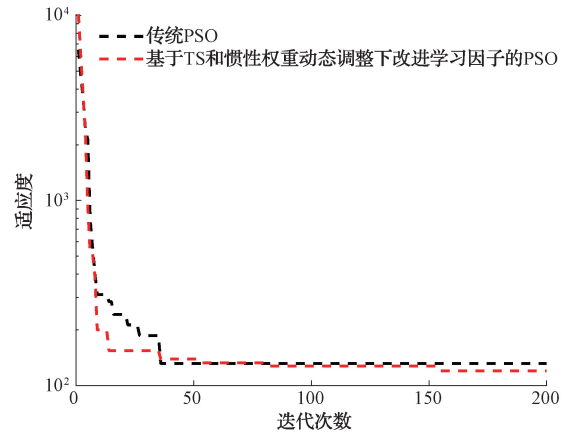
#### 3.2 算法性能验证

为了验证基于 TS 和惯性权重动态调整下改进学习因子的改进粒子群算法(IPSO)性能,选用了 4 个标准的测试函数进行检验,并与传统粒子群算法进行对比。基本参数设置如下： $\omega$  初始值设为 1,  $c_1$ 、 $c_2$  均取 1.7,种群数量取 40,种群维数取 30,实验共运行 20 次最大迭代次数为 100 次。选取的测试函数如表 1 所示。

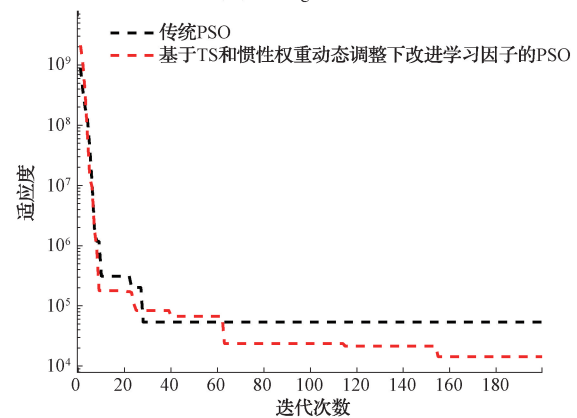
表 1 测试性能所用函数

函数名称	表达式	极值
Rastrigin	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10)$	0
Rosenbrock	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2)$	0
Schwefel	$F_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	0
Griewank	$F_4 = 1/400 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \frac{x_i}{\sqrt{i}} + 1$	0

标准 PSO 算法与本文所提出改进算法的收敛曲线如图 2 所示。



(a) Rastrigin函数  
(a) Rastrigin function



(b) Rosenbrock函数  
(b) Rosenbrock function



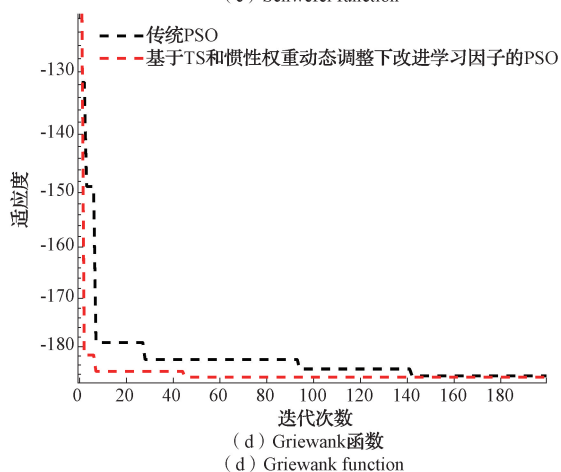
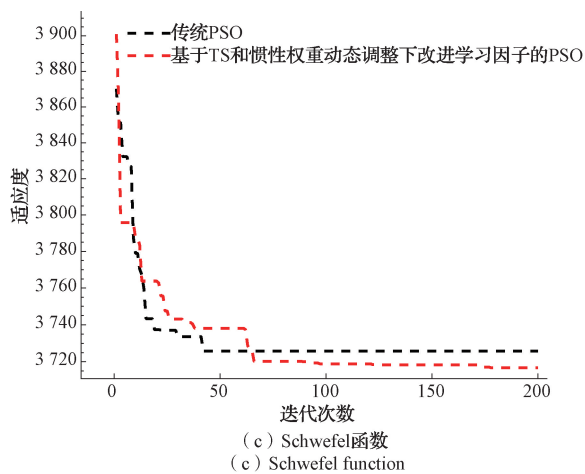


图2 测试函数收敛曲线

Fig. 2 Test function convergence curve

由图2中各个函数的收敛曲线可以得知,随着迭代次数的增加,粒子群逐渐向最优值聚集,改进算法得到的收敛曲线比基本算法得到的收敛曲线更快接近水平方向,且在传统PSO收敛之后继续迭代寻优,这说明基于TS和惯性权重动态调整下改进学习因子的IPSO解决了传统PSO收敛速度慢、精度低的问题,并有效避免了优化过程中容易陷入局部最优的问题。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例系统

本文以图3所示的改进IEEE33节点配电系统为例对所提配电网混合储能系统优化配置方法进行验证。节点23和30接入两台容量为1MW的风机,节点8和17接入两台容量为0.5MW的光伏。节点33接入磷酸铁锂电池-超级电容混合储能系统,基本参数如表2所示。风光出力、负荷需求数据采用国内某地区配电网24h实际运行数据。

### 4.2 优化配置结果分析

1) 方案1,仅考虑风光消纳的混合储能系统优化配置;

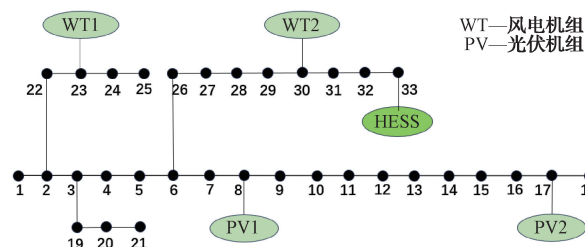


图3 IEEE33节点系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of the IEEE33 node system

表2 混合储能系统基本参数

Table 2 Basic parameters of hybrid energy storage system

参数	磷酸铁	超级
	锂电池	电容
单位建设容量成本/(元/(kW·h))	4 177	23 500
单位功率运行成本/(元/kW)	2 337	1 440
单位功率维护成本/(元/kW)	600	133
单位处置折算系数	0.09	0.03
使用寿命/年	25	20
荷电状态上限	0.85	0.85
荷电状态下限	0.2	0.2

2) 方案2,本文所提考虑风光消纳和碳减排的混合储能系统优化配置。

方案1、2下配电网混合储能系统优化配置结果如表3所示;典型日风光出力、储能充放电及外部购电功率如图4所示;配电网日碳排放量如图5所示;配电网风光消纳率如图6所示。

表3 混合储能系统优化配置结果

Table 3 Optimal configuration results of hybrid energy storage system

方案	磷酸铁锂电池		超级电容		综合成本/ 万元
	功率/ MW	容量/ (MW·h)	功率/ MW	容量/ (MW·h)	
方案1	2.01	4.08	0.59	1.37	6 185.50
方案2	0.97	3.07	0.51	1.19	4 354.27

从表3可以看出,采用本文所提混合储能系统优化配置方法,成本降低了1831.23万元。图4为典型日24h风电、光伏出力、LFP-SCAP混合储能系统充放电、外部购电和负荷需求情况。从图4可以看出,0:00~6:00,风光出力能够完全满足系统负荷需求,混合储能系统处于充电状态,风光剩余功率对外部售电;6:00~12:00,风电、光伏出力减少,混合储能系统通过放电来满足负荷需求,外部购

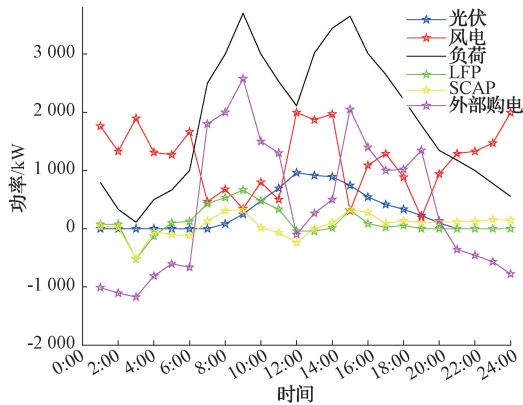


图4 风光出力、储能充放电及外部购电功率

Fig. 4 Wind output, energy storage charge and discharge, and external purchase power

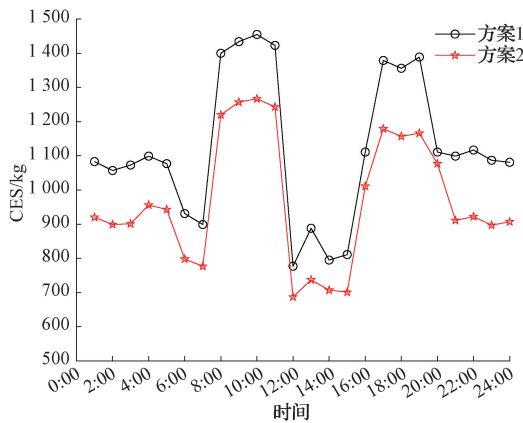


图5 配电网日碳排放量

Fig. 5 Daily carbon emissions of the distribution network

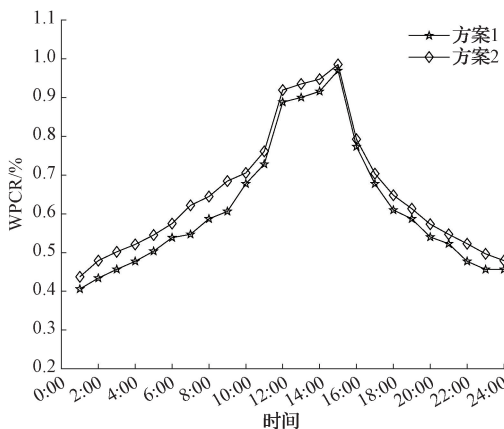


图6 配电网风光消纳率

Fig. 6 Wind/PV consumption rate of the distribution network

电功率也随之升高;12:00~15:00,系统风光出力较盛,能够很好的满足负荷需求,外部购电功率降低;15:00~

24:00,系统负荷需求呈下降趋势,风光储协调出力均能满足系统负荷需求。

本文采用模糊隶属度函数将碳排放划分为高碳、平碳、低碳3个时段,每时段8 h,碳排放时段如表4所示。

表4 碳排放时段

Table 4 Carbon emission period

碳排放时段	对应时段
高碳	7:00~11:00、16:00~20:00
平碳	1:00~5:00、20:00~24:00
低碳	11:00~16:00、5:00~7:00

由图5可见,在高碳时段,方案1最高碳排放量为1455 kg,方案2最高碳排放量为1267 kg,比优化前降低了14.83%;在平碳时段,方案1最高碳排放量为1099 kg,方案2碳排放量降低了14.95%;在低碳时段,方案1碳排放量为777 kg,约为高碳时段碳排放量的1/2,此时段方案2碳排放量仍能降低了13.31%。由此可见,本文所提混合储能系统优化模型能够有效降低系统碳排放量。

由图6可见,方案2配电网中的WPCR值整体高于方案1,由此可见,本文所提储能优化配置方案能充分发挥 HESS 优势,在降低配电网碳排放量同时提高配电网风光消纳水平。

两种方案下的配电网有功网损如图7所示,VDI指标值如图8所示。由图7可见,在考虑风光消纳和碳排放指标下,在节点33接入LFP-SCAP混合储能系统后网损平均降低了27 kW,减损效果达到30%。由图8可见,方案1的VDI值在1上下波动,部分时刻>1,方案2优化结果VDI值始终在1以下。电压稳定性指标值VDI是各节点在一个周期内的电压变化量之和,其值<1代表系统电压稳定,且越小越好,由此可见本文所提方法能有效提升配电网电压稳定性。

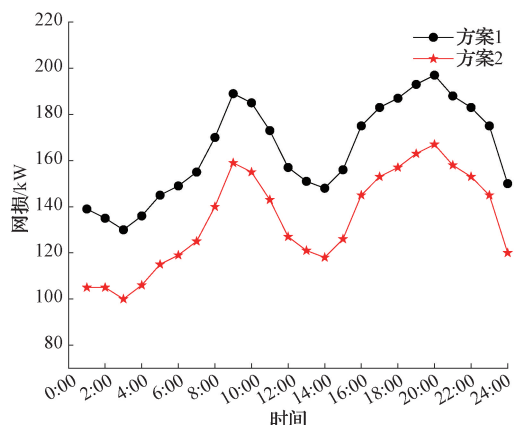


图7 配电网网损曲线

Fig. 7 Network loss curve of the distribution network

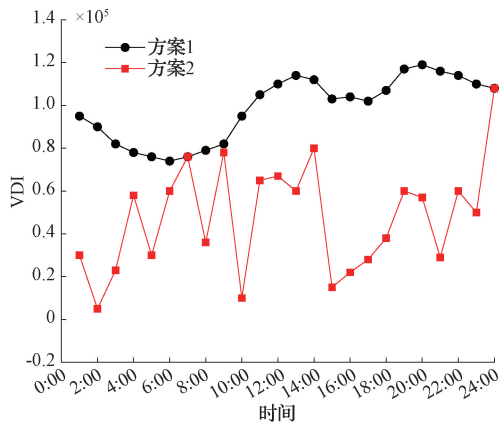


图8 配电网电压稳定性 VDI 指标值

Fig.8 The VDI index value of the distribution network voltage stability

## 5 结论

本文针对实现“双碳”目标和配电网中风光等分布式新能源接入配电网后带来的消纳和碳排放问题,提出了考虑风光消纳和碳排放指标的混合储能系统优化配置模型,并运用一种基于 TS 和惯性权重动态调整下改进学习因子的 IPSO 对模型进行求解。研究表明,配电网配置磷酸铁锂电池-超级电容混合储能系统后,提高了配电网新能源消纳水平,降低了系统碳排放量和系统网损,并提升了系统电压稳定性。

未来将进一步开展不同规模和类型的混合储能系统如大容量电化学储能电池与氢储能混合储能系统接入配电网后的优化配置问题。

## 参考文献

[1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.  
XIN B AN, SHAN B G, LI Q H, et al. Rethinking the "Three elements of energy" under the "dual carbon" goal [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9):3117-3126.

[2] 辛保安,陈梅,赵鹏,等.碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6919-6931.  
XIN B AN, CHEN M, ZHAO P, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply safety constraint under carbon neutrality objective in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(19):6919-6931.

[3] 辛保安,李明节,贺静波,等.新型电力系统安全防御体系探究[J].中国电机工程学报,2023,43(15):5723-

5732.  
XIN B AN, LI M J, HE J B, et al. Research on new power system security defense system [J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(15):5723-5732.

[4] JIAO P H, CHEN J J, CAI X, et al. Joint active and reactive for allocation of renewable energy and energy storage under uncertain coupling[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117582.

[5] 杨茵,刘毅力,崔关奇.计及分布电源消纳的混合储能系统优化配置[J].国外电子测量技术,2023,42(7):188-196.  
YANG Y, LIU Y L, CUI G Q. Optimal configuration of hybrid energy storage system taking into account the consumption of distributed power sources [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(7):188-196.

[6] 张强.主动配电网中混合储能的协同优化配置运行与评估研究[D].北京:中国矿业大学,2020.  
ZHANG Q. Research on cooperative optimal configuration, operation and evaluation of hybrid energy storage in active distribution network [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020.

[7] 刘冰倩,吴涵,黄建业,等.考虑有功一无功协同优化的风场、光伏电站储能系统容量配置研究[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(11):82-89.  
LIU B Q, WU H, HUANG J Y, et al. Research on capacity configuration of energy storage system of wind farm and photovoltaic power Station considering active-reactive power cooperative optimization [J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2019, 33(11):82-89.

[8] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-169.  
XIE X R, MA N J, LIU W, et al. Review and prospect of energy storage application in new power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(1):158-169.

[9] LI R, WANG W, CHEN Z, et al. Optimal planning of energy storage system in active distribution system based on fuzzy multi-objective bi-level optimization[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018(2):342-355.

[10] LI R, WANG W, WU X Z, et al. Cooperative planning model of renewable energy sources and energy storage units in active distribution systems: A bi-level model and Pareto analysis. [J]. Energy,

- 2019, 168: 30-42.
- [11] BOONLUK P, SIRITARATIWAT A, FUANGFOO P, et al. Optimal siting and sizing of battery energy storage systems for distribution network of distribution system operators [J]. Batteries, 2020, 6(56): 56.
- [12] 马永翔,唐浦容,闫群民,等.基于VMD-STFT提升源-荷互动可靠性的混合储能优化配置[J/OL]. 可再生能源: 1-8 [2023-10-17].  
MA Y X, TANG P R, YAN Q M, et al. Optimization configuration of hybrid energy storage based on VMD-STFT to improve the reliability of source-Charge interaction [J/OL]. Renewable Energy: 1-8 [2023-10-17].
- [13] 谢应昭,卢继平,翁宗林,等.改善风电输出功率特性的混合储能系统优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(7):2052-2058.  
XIE Y ZH, LU J P, WENG Z L, et al. Optimization of hybrid energy storage system for improving wind power output characteristics [J]. Power Grid Technology, 2016, 40(7):2052-2058.
- [14] ALZHRANI A, UR RAHMAN M, HAFEEZ G, et al. A strategy for multi-objective energy optimization in smart grid considering renewable energy and batteries energy storage system [J]. IEEE Access, 2023, 11:33872-33886.
- [15] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等.考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 11-19.  
QI X G, YAO F X, ZHU T T, et al. Hybrid energy storage capacity optimization for power system considering large-scale wind power access [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 41(10):11-19.
- [16] 赵伟,熊正勇,潘艳,等.计及碳排放流的电力系统低碳规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9):23-33.  
ZHAO W, XIONG ZH Y, PAN Y, et al. Low-carbon planning for power systems with carbon emission streams [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 47(9):23-33.
- [17] WANG H J, SHEN X D, LIU J Y. Planning of new distribution network considering green power certificate trading and carbon emissions trading [J]. Energies, 2022, 15(7): 2435.
- [18] 丰俊杰,曾平良,李亚楼,等.考虑充放电策略对储能寿命影响的新型分布式储能优化配置研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-8 [2023-10-17].  
FENG J J, ZENG P L, LI Y L, et al. Research on optimal configuration of new distributed energy storage considering the influence of charge and discharge strategy on energy storage life [J/OL]. Electrical measurement and instrumentation: 1-8 [2023-10-17].
- [19] HUANG Y X, ZHAO L, QIU W Q, et al. Evaluation of acceptance capacity of distributed generation in distribution network considering carbon emission[J]. Energies, 2022, 15(12): 4406.
- [20] 欧阳斌,马瑞,朱文广,等.计及碳减排分摊的配电网分布式储能集群配置[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12 [2023-10-17].  
OUYANG B, MA R, ZHU W G, et al. Distribution network distributed energy storage cluster configuration with carbon emission reduction allocation [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12 [2023-10-17].
- [21] SABOORI H, HEMMATI R. Considering carbon capture and storage in electricity generation expansion planning [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1371-1378.
- [22] 陈盛燃.碳排放约束下可再生能源接入电网储能多阶段规划模型[J]. 能源与环保, 2022, 44(9):240-245.  
CHEN SH R. Multi-stage planning model of renewable energy connected to grid energy storage under carbon emission constraints [J]. Energy and Environmental Protection, 2022, 44(9):240-245.
- [23] 张雪菲,孙阔,张章,等.考虑源荷不确定性与碳减排的复合储能系统优化配置模型[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 42-49.  
ZHANG X F, SUN K, ZHANG ZH, et al. Optimal configuration model of composite energy storage system considering source load uncertainty and carbon emission reduction [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(5): 42-49.
- [24] 张俊潇,高崇,李京平,等.考虑低碳和柔性负荷的有源配电网混合整数二阶锥规划[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 66-73.  
ZHANG J X, GAO CH, LI J P, et al. Hybrid integer second-order cone planning for active distribution network considering low carbon and flexible load [J]. China Electric Power Construction, 2022, 43(12): 66-73.
- [25] 郭红霞,任智君.考虑不同投资主体储能运行策略的主动配电网多目标规划[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 22-28,34.  
GUO H X, REN ZH J. Multi-objective planning of active distribution network considering energy storage



- operation strategies of different investors [J]. Smart Power, 2019, 47(11): 22-28,34.
- [26] 卓荣庆,孙歆,陈阳.融合禁忌搜索和惯性权重动态调整的二进制粒子群优化算法[J].信息与电脑(理论版),2023,35(12):57-60.
- ZHUO R Q, SUN X, CHEN Y. Binary particle swarm optimization algorithm combining tabu search and inertia weight dynamic adjustment [J]. Information and Computers (Theoretical Edition),

2019,35(12):57-60.

#### 作者简介

刘同和,高级工程师,主要研究方向为调度运行。

E-mail:23648692@qq.com

樊濠诚(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为配电网系统优化配置。

E-mail:18999859298@163.com