

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.06.002

# 基于多目标粒子群算法的配电网储能优化配置研究

Research on the optimal allocation of energy storage in distribution network based on multi-objective particle swarm optimization algorithm

刘子祺<sup>1</sup>, 苏婷婷<sup>1</sup>, 何佳阳<sup>1</sup>, 王裕<sup>1,2\*</sup>  
LIU Ziqi<sup>1</sup>, SU Tingting<sup>1</sup>, HE Jiayang<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1,2\*</sup>

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 中国科学院广州能源研究所 广东省新能源和可再生能源研究开发与  
应用重点实验室, 广州 510640)

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key  
Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou Institute of Energy Conversion,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**摘要:** 储能技术具有对功率和能量的时间迁移能力,能有效改善可再生能源的输出特性和可调度性,是构建新型电力系统解决可再生能源大规模并网问题及促进资源利用的关键技术。研究不同应用场景下储能优化配置对其在配电网中的有效应用具有重要意义。针对综合考量技术性和经济性指标的配电网储能配置多目标优化问题,提出一种基于多目标粒子群优化(MOPSO)算法的配电网储能优化配置方法。采用MOPSO算法对多目标储能配置模型求解,并在种群更新过程中引入自适应变异策略以扩大粒子对空间的探索能力,有效改善种群多样性的同时保证后期收敛性,在储能配置问题上得到全局最优解,实现技术与经济指标多目标综合优化。通过Matlab仿真验证所提方法的可行性与优越性。该研究成果对探索配电网储能优化配置方案具有重要的理论与工程价值。

**关键词:** 配电网; 储能优化配置; 多目标粒子群优化算法; 新型电力系统; 可再生能源; 大规模并网; 碳中和

**中图分类号:** TK 01: TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2023)06-0009-08

**Abstract:** The energy storage technology has the ability to adjust power and the time of energy, so as to effectively improve the output characteristics and shedulability of renewable energy. Thus, it is important to study the energy storage optimized configurations under different scenarios. Taking the technical and economic indicators into consideration comprehensively, an energy storage allocation method based on multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm is proposed. The multi-objective energy storage configuration model can be solved by MOPSO, and the adaptive mutation strategy is introduced in the population updating process to improve the exploration capability of particles and ensure the population diversity and the late convergence. The global optimal solution for energy storage comprehensively optimizes the technical and economic indicators. The feasibility and superiority of the proposed method are verified by Matlab simulation, and the research results have theoretical and engineering value for the optimal configurations of energy storage systems in distribution network.

**Keywords:** distribution network; optimal configuration of energy storage; multi-objective particle swarm optimization; new power system; renewable energy; large-scale grid connection; carbon neutrality

## 0 引言

在我国碳达峰、碳中和的宏伟目标下,低碳化转型将成为我国电力系统的重要发展战略,高比例新能源将成为我国未来电力系统的重要特征,光伏、风电等可再生能源在电力工业中发展迅速<sup>[1-2]</sup>。然而,可再生能源具有强烈的随机性、间歇性和波动性,导致其难以持续稳定的输出功率,大规模可

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(62073084); 广东省自然科学基金项目(2021A1515012398); 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室开放基金项目(E139kf0401)

National Natural Science Foundation of China (62073084);  
Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515  
012398); Guangdong Provincial Key Laboratory of New and  
Renewable Energy Research and Development (E139kf0401)

再生能源并网将增加电力系统优化运行的难度,给电力系统的安全可靠运行带来不利影响<sup>[3-5]</sup>。

储能作为新型电力系统的重要组成部分,具有响应速度快、便于控制以及双向调节等特点,可在不同时间尺度上控制功率和能量的流动,有效改善电力系统的稳定性和运行特性<sup>[6-8]</sup>。其中,储能配置是储能应用重要的前期工作环节,研究不同应用场景下分布式储能的优化配置对其在配电网中高效应用至关重要。合理规划分布式储能不仅可以实现能源充分利用、降低配电网备用容量,还可以发挥分布式储能的规模化汇聚效应,提高配电网供电安全性及运行效率<sup>[9-10]</sup>。

目前,国内外关于储能规划配置技术已有许多研究,主要以储能系统投资成本或全寿命周期综合成本最低等经济性指标为目标,以储能的运行特性和平抑分布式电源输出功率波动指标为约束,从而确定储能系统位置和容量的最优配置<sup>[11-15]</sup>。其中,关于参与电网调峰和新能源消纳的储能优化配置研究大多以经济性为目标。关于辅助新能源跟踪计划出力的储能配置研究,主要关注如何利用储能降低新能源预测偏差的影响。因此,现有的配电网储能配置方法无法有效平衡技术性和经济性指标,尤其对于须考虑系统源网荷储综合优化调度,多运行场景下储能配置的需求并未建立充分约束<sup>[16-18]</sup>。此外,现有研究工作主要针对平滑功率、跟踪出力、一次调频等单一场景,储能配置优化方法以单一目标为主,无法有效地兼顾技术性和经济性要求<sup>[19-20]</sup>。因此,构建综合考量技术性和经济性的配电网储能配置多目标优化方法,对于配电网储能的高效利用和性能提升具有重要的理论和工程意义。

由此,本文提出一种基于多目标粒子群优化(Multi - objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)算法的配电网储能优化配置方法。采用MOPSO算法对配电网储能配置模型求解,并在种群更新过程引入自适应变异策略以扩大粒子对空间探索能力。对比传统粒子群算法,本文所提的MOPSO算法可在改善种群多样性的同时保证后期收敛性,在储能系统选址定容问题上更易得到全局最优解,实现配电网储能配置的技术与经济性的多目标综合优化。本文所提方法可为配电网储能优化配置提供新的可参考途径与方案。

## 1 配电系统静态电压稳定指标的构建

为了衡量储能接入配电网对电能质量的改善效果,本文考虑的系统静态电压稳定指标(Voltage Stability Index, VSI)是立足配电网系统稳定性,基于

潮流解存在性的静态电压稳定性指标。根据简单的2节点系统可推导出系统静态电压稳定指标,如图1所示。

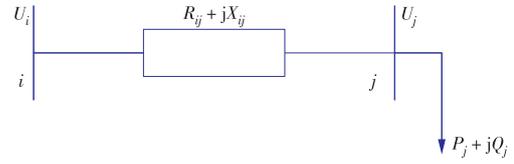


图1 简单2节点系统

Fig. 1 Simple two-node system

因此,由图1可得

$$P_j - jQ_j = U_j^* \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{R_{ij} + jX_{ij}}, \quad (1)$$

式中: $U_i$ 为送端节点*i*的电压; $U_j$ 为受端节点*j*的电压; $R_{ij}$ 和 $X_{ij}$ 分别为节点*i,j*之间支路的电阻和电抗; $P_j$ 和 $Q_j$ 分别为等值到节点*j*的总有功功率和无功功率。

由式(1)可得

$$U_j^4 - (U_i^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij}) \cdot U_j^2 + (P_j^2 + Q_j^2) \cdot (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) = 0. \quad (2)$$

要确保配电网的可行潮流解存在,则有

$$(U_j^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij})^2 - 4(P_j^2 + Q_j^2) \cdot (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \geq 0. \quad (3)$$

对式(3)适当简化处理可得

$$U_j^4 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})^2 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \cdot U_j^2 \geq 0. \quad (4)$$

定义节点*j*的静态电压稳定指标为

$$\varepsilon_{\text{VSI},j} = U_j^4 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})^2 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \cdot U_j^2. \quad (5)$$

对于接入储能且含分布式电源的多节点配电网系统,本文提出用于衡量整个系统的静态电压稳定指标为

$$\varepsilon_{\text{VSI}} = \frac{1}{n} \sum_{j \in \Gamma} \varepsilon_{\text{VSI},j}, \quad (6)$$

式中: $\Gamma$ 为配电网系统中除平衡节点外的母线节点集合; $n$ 为该母线节点集合的节点个数。

稳态运行系统必须满足 $\varepsilon_{\text{VSI}} \geq 0$ ,用 $\varepsilon_{\text{VSI}}$ 的大小来判定配电网的静态电压稳定水平, $\varepsilon_{\text{VSI}}$ 越小,表明配电网静态电压稳定水平越低。配电网中 $\varepsilon_{\text{VSI}}$ 最小的节点也即该配电网最容易发生电压崩溃的节点。

## 2 配电网储能配置模型

### 2.1 目标函数

分布式电源的接入以及各类负荷的时序性,引起静态电压稳定性的波动对系统安全运行非常重要,而储能的合理规划能够明显改善潮流分布,提高末端节点的电压稳定性。因此,本文综合考虑储

能配置的技术性和经济性,选取以下 3 个目标函数来衡量其定容选址的合理性。

### 2.1.1 系统静态电压稳定性

将第 1 节提出的系统静态电压稳定指标作为目标函数,选取运行 1 d 稳定性最低的时刻来评判系统,  $h$  为 24 h,则由式(6)可得

$$f_1 = \min \{ \varepsilon_{VSL,h} \} \quad (7)$$

### 2.1.2 储能成本

本文的研究内容是在现有配电网系统中接入储能装置,所以此处不考虑储能装置之外的投资成本,只计算储能装置的投资成本和运维成本。为方便模型搭建以及储能日运行计划的研究,将以上不同维度的成本转化成典型日成本,其计算公式如下

$$f_2 = C_{ESS} + C_{OM}, \quad (8)$$

$$C_{ESS} = C_R \sum_{i=1}^{n_{ESS}} (\alpha_i S_{n,i} + \beta_i P_{d,i}), \quad (9)$$

$$C_{OM} = \frac{C_y}{365} \sum_{i=1}^{n_{ESS}} S_{n,i}, \quad (10)$$

$$C_R = \frac{r(1+r)^y}{365[(1+r)^y - 1]}, \quad (11)$$

式中:  $C_{ESS}$ ,  $C_{OM}$  分别为储能装置日投资成本和运维成本;  $C_R$  为日成本转化系数;  $C_y$  为储能装置的年运行维护成本;  $S_{n,i}$  为第  $i$  个储能的额定容量;  $P_{d,i}$  为第  $i$  个储能的日功率;  $r$  为折现率;  $y$  为储能系统使用年限;  $n_{ESS}$  为储能个数;  $\alpha_i, \beta_i$  分别为第  $i$  个储能的单位容量成本和单位功率成本。

### 2.1.3 有功网损

在配电网系统中,储能装置的充电和放电可以等效为电源和负荷,通过调节潮流电流,减小馈线的有功网损,从而提高配电网系统的经济性,日有功网损计算公式如下

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in L} [G_{ij}(U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t})], \quad (12)$$

式中:  $L$  为配电网系统的所有支路;  $G_{ij}$  为节点  $i, j$  的电导集合;  $U_{i,t}, U_{j,t}$  为  $t$  时刻节点  $i, j$  的电压;  $\delta_{ij,t}$  为  $t$  时刻支路始末节点  $i, j$  的相角差。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 有功平衡约束

$$\sum_{m=1}^{n_C} P_{G,m}(t) + \sum_{i=1}^{n_{ESS}} P_{ESS,i}(t) + \sum_{j=1}^{n_{DC}} P_{DG,j}(t) - P_{load}(t) - P_{loss}(t) = 0, \quad (13)$$

式中:  $P_{G,m}(t)$  为  $t$  时刻第  $m$  个火电机组的有功功率;  $P_{ESS,i}(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  个储能装置的充/放电功率;  $P_{DG,j}(t)$  为  $t$  时刻第  $j$  个分布式电源的有功功率;  $P_{load}(t), P_{loss}(t)$  分别为  $t$  时刻配电网系统的总负荷功率和总网损功率;  $n_C, n_{ESS}, n_{DC}$  分别为火电机组、储能

装置和分布式电源接入个数。

### 2.2.2 储能约束

$$\begin{cases} P_{ESS,i}^{\min} \leq P_{ESS,i}(t) \leq P_{ESS,i}^{\max} \\ \text{if } P_{ESS,i}(t) \leq 0, \\ S_{ESS,i}(t+1) = S_{ESS,i}(t) - P_{ESS,i}(t)\Delta t \cdot \eta_{ch,i} \\ \text{if } P_{ESS,i}(t) > 0, \\ S_{ESS,i}(t+1) = S_{ESS,i}(t) - P_{ESS,i}(t)\Delta t/\eta_{dis,i} \\ S_{ESS,i}^{\max} \times 20\% \leq S_{ESS,i}(t+1) \leq S_{ESS,i}^{\max} \times 90\% \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $P_{ESS,i}^{\min}, P_{ESS,i}^{\max}$  分别为第  $i$  个储能装置充、放电功率的最小值和最大值;  $\Delta t$  为储能装置充、放电时长;  $\eta_{ch,i}, \eta_{dis,i}$  分别为第  $i$  个储能装置充、放电效率;  $S_{ESS,i}(t), S_{ESS,i}^{\max}$  分别为第  $i$  个储能装置的  $t$  时刻容量和最大容量。

## 3 多目标储能配置优化算法

针对配电网系统的储能配置优化这一多目标非线性规划问题,本文采用 MOPSO 算法对模型求解。标准的 MOPSO 算法具有参数简单、收敛速度快的优点,但在求解多目标储能配置优化问题时,存在以下问题。

(1) 面对多维问题,其帕累托最优解的分布性不强。

(2) 粒子的社会认知容易使得粒子过快聚集,使其丧失种群的多样性而陷入局部最优。

(3) 初始化粒子的位置对算法的收敛速度和精度以及最终结果的呈现有较大影响。究其根本,就是粒子对于解空间的探索不够全面。因此,本文在标准 MOPSO 的种群更新过程中引入自适应变异策略以扩大粒子对空间的探索能力,在改善种群多样性的同时保证后期收敛性。

### 3.1 标准 MOPSO 算法

相较于传统粒子群算法寻找的全局最优解, MOPSO 追求的是非劣解,通过分析其支配关系,求得帕累托最优解集。根据粒子的惯性、个体认知与社会认知,其速度和位置的更新公式如下

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(x_{pbest,i}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(x_{gbest}(t) - x_i(t)), \quad (15)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (16)$$

$$w(t) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \times t, \quad (17)$$

式中:  $i$  为粒子编号;  $t$  为当前迭代次数;  $x_{pbest,i}(t)$  为粒子  $i$  迭代到第  $t$  代的个体最佳位置;  $x_{gbest}(t)$  为种群粒子迭代到第  $t$  代的全局最佳位置;  $c_1, c_2$  为个体及全局学习因子,一般处于 0~2 之间;  $r_1, r_2$  为 0~1 的随机常数;  $w$  为惯性权重,通常随迭代次数逐渐减小以增强收敛性;  $w_{\max}, w_{\min}$  分别为惯性权重的上、下限;  $t_{\max}$  为

最大迭代次数。

### 3.2 自适应变异策略

为提高粒子种群对解空间的全局探索能力,克服传统粒子群算法容易陷入局部最优的问题,在算法的基本框架中增加随机变异算子,通过对代际全局最佳位置  $x_{gbest}$  的随机变异来提高粒子群算法跳出局部最优解的能力,让算法在发生早熟收敛时,能够进入解空间的其他区域继续进行搜索,直到最后找到全局最优解。

由此,设  $f_i$  为第  $i$  个粒子的适应度(目标函数值),则可根据式(18)求出整个群体  $n$  个粒子的平均适应度  $f_{avg}$ 。然后,按照式(19)确定粒子群归一化定标因子  $f$ ,则可以根据式(20)得到整个群体的群体适应度方差  $\sigma^2$ 。

$$f_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad (18)$$

$$f = \begin{cases} \max\{|f_i - f_{avg}|\}, \max\{|f_i - f_{avg}|\} > 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases}, \quad (19)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i - f_{avg}}{f}\right)^2. \quad (20)$$

对满足变异条件的  $x_{gbest}$  按一定的概率  $p_m$  变异,  $p_m$  的计算公式如下

$$p_m = \begin{cases} u, \sigma^2 < \sigma_d^2 \text{ 且 } f(x_{gbest}) > f_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (21)$$

式中:  $u$  为 0.1~0.3 之间的随机数;  $\sigma_d^2$  的取值一般远小于  $\sigma^2$  的最大值;  $f_d$  可设置为理论最优值。对于  $x_{gbest}$  的变异操作,采用增加随机扰动的方法,设  $x_{gbest,i}$  为  $x_{gbest}$  的第  $i$  维取值,  $\eta$  为服从 Gauss(0,1) 分布的随机变量,则

$$x_{gbest,i} = x_{gbest,i} (1 + 0.5\eta). \quad (22)$$

### 3.3 算法流程

本文根据第 2 节中式(7)~(14)所搭建的多目标储能配置优化模型,并基于式(15)~(22)的自适应变异的 MOPSO 算法,通过 Matlab 编写算法程序对该模型求解。由此,本文提出的储能优化配置实现流程如图 2 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真设置

为验证所提模型及算法的可行性与优越性,本文采用 IEEE 14 节点系统进行算例仿真验证,如图 3 所示。图 4、图 5 分别为典型日负荷曲线和典型日风电、光伏出力曲线。算例仿真系统主要配置如下。

(1)火电机组:节点 1 接入可控常规电源 G1,最大功率  $P_{max}=300$  MW;节点 8 接入可控常规电源 G2,

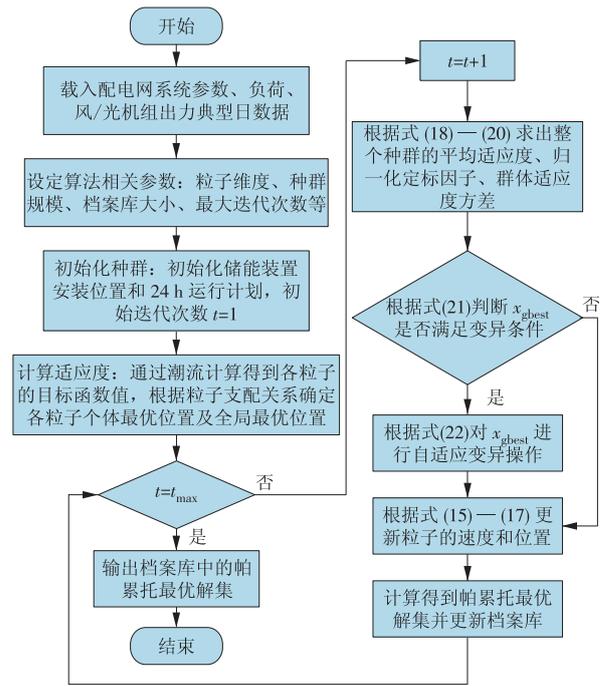


图 2 基于 MOPSO 算法的储能配置优化求解流程  
Fig. 2 Solution for the optimization process of energy storage configuration based on MOPSO

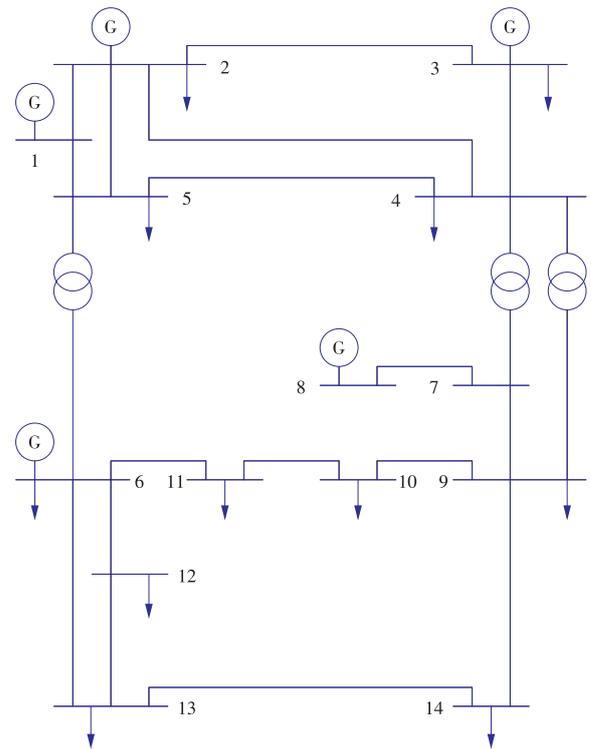


图 3 IEEE 14 节点系统

Fig. 3 IEEE 14-node system

最大功率  $P_{max}=100$  MW。

(2)风电/光伏机组:节点 2 接入风电机组,额定功率为 240 MW;节点 3 接入光伏机组,额定功率为 200 MW。

(3)系统仿真参数与变量设置见表 1。

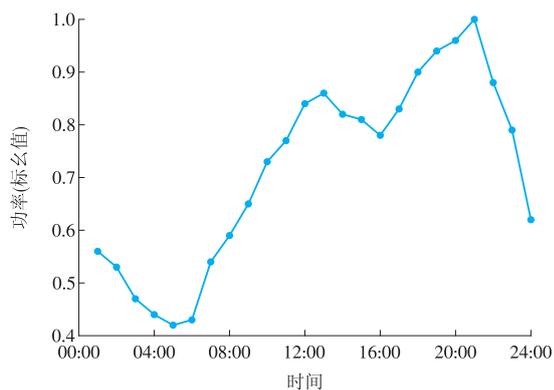


图 4 典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve

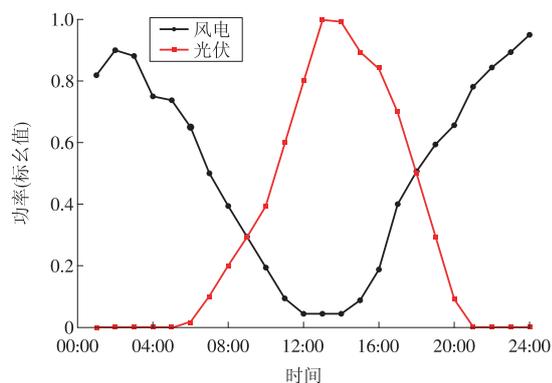


图 5 典型日风电、光伏出力曲线

Fig. 5 Typical daily wind power and photovoltaic output curves

表 1 仿真参数及变量的设置

Table 1 Simulation parameters and variable settings

参数及变量	取值
最大迭代次数/次	50
种群规模/个	50
档案库规模/个	200
惯性权重范围	0.5~0.9
储能电量(SOC)范围/%	20~90
充放电效率 $\eta$ /%	90
学习因子 $c_1, c_2$	1.7, 1.8
储能单位功率成本 $\alpha$ (万元·MW <sup>-1</sup> )	0.12
储能单位容量成本 $\beta$ (万元·MW <sup>-1</sup> )	0.18
储能年运维成本 $C_f$ (万元·MW <sup>-1</sup> )	5

## 4.2 仿真结果分析

基于上述仿真算例及参数设置, 本文将从以下 3 种场景进行仿真验证和分析。

场景 1: 不接入储能; 场景 2: 接入储能, 配置方法采用传统 MOPSO 算法进行求解; 场景 3: 接入储能, 配置方法采用本文所提引入自适应变异策略的优化 MOPSO 算法进行求解与分析。

本文在配电网系统中接入 2 个储能, 决策变量为其 24 h 运行功率。根据算法解得帕累托最优解集并对其进行排序, 以系统静态电压稳定性指标为

首要目标, 有功网损次之。

2 种场景各列出 3 个帕累托最优解进行对比分析, 不同场景下的优化结果见表 2。表中:  $f_1$  为静态电压稳定性指标;  $f_2$  为储能成本;  $f_3$  为有功网损。

表 2 不同场景下的试验结果

Table 2 Test results in different scenarios

场景	储能接入位置及容量/(MW·h)	$f_1$	$f_2$ /万元	$f_3$ /MW
1	—	1.083 6	—	1.706 9
	10(0.987 3), 12(1.104 5)	1.165 6	0.903 1	1.580 2
	10(0.965 5), 14(0.940 7)	1.158 6	0.879 3	1.601 0
	12(1.011 5), 14(1.114 8)	1.150 5	0.840 9	1.617 0
	平均值	1.158 2	0.874 4	1.599 4
3	10(0.941 9), 12(1.051 5)	1.235 0	0.844 5	1.499 7
	10(0.911 0), 14(0.897 2)	1.220 6	0.821 2	1.501 0
	12(0.971 3), 14(1.069 6)	1.219 0	0.799 6	1.528 6
	平均值	1.224 9	0.821 8	1.509 8

由表 2 可知, 在没有接入储能的场景 1 中, 系统静态电压稳定指标  $f_1$  和有功网损  $f_3$  分别为 1.083 6, 1.706 9 MW; 而在接入储能, 采用传统 MOPSO 算法的场景 2 中, 系统静态电压稳定指标  $f_1$  和有功网损  $f_3$  的平均值分别为 1.158 2, 1.599 4 MW, 对比场景 1 没有储能接入时分别优化了 6.9%, 6.3%; 而在接入储能, 采用本文所提出的优化 MOPSO 算法的场景 3 中静态电压稳定指标  $f_1$  和有功网损  $f_3$  的平均值分别为 1.224 9, 1.509 8 MW, 对比场景 1 没有储能接入时分别优化了 13.03%, 11.50%。

此外, 采用本文所提出的优化 MOPSO 算法, 场景 3 中接入的储能容量也普遍比采用传统 MOPSO 算法的场景 2 接入的储能容量小, 且储能成本  $f_2$  平均值为 0.821 8 万元, 比场景 2 的储能成本  $f_2$  平均值 0.874 4 万元降低了 6.4%。

由以上仿真试验数据可知, 接入储能能够有效改善潮流分布, 减少有功网损, 提高系统静态电压稳定性。

而采用本文所提出的引入自适应变异策略的优化 MOPSO 算法在系统静态电压稳定指标、有功网损、储能成本等各项指标上均优于传统 MOPSO 算法, 在解决储能系统的选址定容问题上更容易得到全局最优解, 实现配电网储能配置的技术与经济目标多目标综合优化。

为进一步验证本文提出的优化 MOPSO 算法的可行性与优越性, 选取场景 3 中具有代表性的最优解, 储能接入位置及容量为 10(0.941 9 MW·h), 12(1.051 5 MW·h) 进行深入分析。采用优化 MOPSO 算法, 其 24 h 储能运行计划如图 6、图 7 所示。

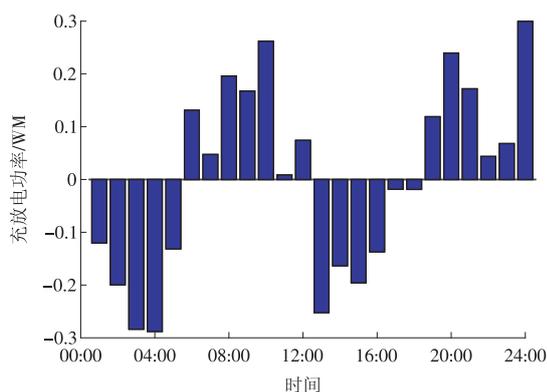


图 6 节点 10 储能运行计划

Fig. 6 Energy storage operation plan at node 10

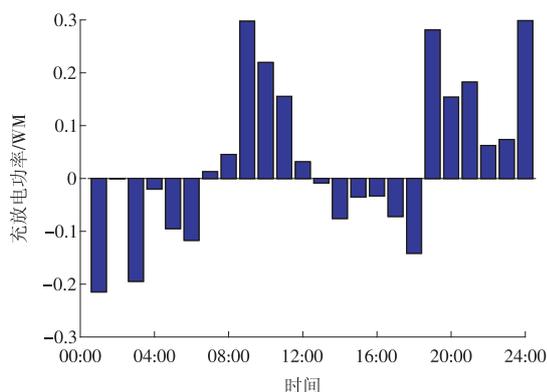


图 7 节点 12 储能运行计划

Fig. 7 Energy storage operation plan at node 12

由图 6、图 7 结合典型日负荷曲线及风电、光伏出力曲线可以看出, 2 个节点处储能装置运行规律大致相同。

00:00—06:00, 负荷处于低谷期而风电出力处于高峰期, 储能装置充电储存多余电能; 07:00—12:00, 负荷剧增且大于风电、光伏出力之和, 储能放电以供给负荷; 13:00—18:00, 负荷出现小低谷且小于风电、光伏出力之和, 储能充电; 19:00—24:00, 负荷处于高峰期, 储能放电为配电网系统提供功率。

整日运行计划中, 储能的充/放电功率基本持平, 能够良好地保持 SOC 在限制范围内, 延长储能寿命的同时, 便于次日运行。

此外, 以节点 10 为例, 储能装置接入前后系统负荷曲线对比如图 8 所示。由图 8 可知, 接入储能前的日负荷平均值为 0.715 0 (标幺值), 峰谷差为 0.581 3 (标幺值), 接入优化储能配置后的日负荷平均值为 0.705 7 (标幺值), 峰谷差为 0.379 6 (标幺值)。由此, 采用本文所提优化储能配置对于平抑负荷波动也具有一定的作用。

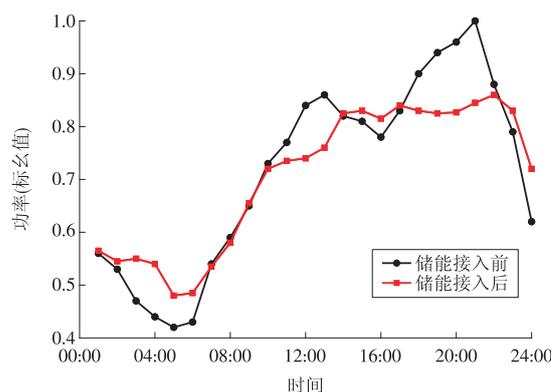


图 8 储能接入前后系统负荷曲线

Fig. 8 System load curve before and after accessing the energy storage

### 5 结束语

本文从改善配电网静态电压稳定性和经济性的角度, 对储能选址定容这一非线性规划问题, 提出一种基于 MOPSO 算法的配电网储能优化配置方法。以系统静态电压稳定指标、储能成本和有功网损为目标函数建立模型, 通过在 MOPSO 算法中引入自适应变异策略, 能够很好地改善帕累托最优解集的分布性, 寻求全局最优解, 从而进行模型优化求解; 对 IEEE 14 节点系统进行算例分析, 验证所提方法的有效性和优越性。采用本文所提出的储能配置方法可有效提高系统静态电压稳定性、改善潮流分布、减少有功损耗, 并对负荷起到一定的削峰填谷作用, 可为配电网储能优化配置提供可参考途径与方案。

### 参考文献:

[1]张金平,周强,王定美,等.“双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J].华电技术,2021,43(12):46-51.  
ZHANG Jinpin, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 46-51.

[2]HANSEN K, BREYER C, LUND H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems [J]. Energy, 2019, 175: 471-480.

[3]王盛,谈健,史文博,等.英国新型电力系统建设经验以及对我国省级电网发展启示[J].综合智慧能源,2022, 44(7):19-32.  
WANG Sheng, TAN Jian, SHI Wenbo, et al. Practices of the new power system in the UK and inspiration for the development of provincial power systems in China [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 19-32.

[4]康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学

- 问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):2-11.
- [5] BOSE B K. Power electronics, smart grid, and renewable energy systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11):2011-2018.
- [6] DAI R, ESMAEILBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: A comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4):3163-3174.
- [7] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1):28-51.
- HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):28-51.
- [8] 韩世旺, 赵颖, 张兴宇, 等. 面向碳中和的新型电力系统氢储能调峰技术研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9):20-26.
- HAN Shiwang, ZHAO Ying, ZHANG Xingyu, et al. Researches on hydrogen storage peak-shaving technology for new power systems to achieve carbon neutrality [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9):20-26.
- [9] 闫群民, 穆佳豪, 马永翔, 等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2):67-74.
- YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):67-74.
- [10] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1):13-25.
- LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side [J]. Electric Power, 2022, 55(1):13-25.
- [11] 王秋惠, 孙立国, 李佳雯. 基于相变储能的建筑光伏系统储能优化配置研究[J]. 华电技术, 2021, 43(9):54-61.
- WANG Qiuhui, SUN Liguang, LI Jiawen. Optimized configuration of energy storage devices of building photovoltaic system with phase-change energy storage [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9):54-61.
- [12] SAVKIN A, KHALID M, AGELIDIS V. A constrained monotonic charging/discharging strategy for optimal capacity of battery energy storage supporting wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1224-1231.
- [13] 王守相, 王凯, 赵歌. 平抑有源配电网功率波动的储能配置与控制方法研究综述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6):1188-1195.
- WANG Shouxiang, WANG Kai, ZHAO Ge. Configuration and control of energy storage system for fluctuation mitigation in an active distribution network—A review [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(6):1188-1195.
- [14] 朱佩雪, 郭倩, 李灵至, 等. 考虑主动配电网脆弱性的分布式储能配置[J/OL]. 电测与仪表:1-8(2022-10-20)[2023-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1512.014.html>.
- ZHU Peixue, GUO Qian, LI Lingzhi, et al. Distributed energy storage configuration considering the vulnerability of active distribution network [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8 (2022-10-20)[2023-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1512.014.html>.
- [15] 李翠萍, 闫佳琪, 孙大朋, 等. 配电网中储能参与多场景的多维经济性评估[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(5):471-479.
- LI Cuiping, YAN Jiaqi, SUN Dapeng, et al. Multi-dimensional economic evaluation of energy storage participating in multi-scenarios in distribution network [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(5):471-479.
- [16] 楼平, 张磊, 刘莹, 等. 计及配电网综合弹性与经济性的储能优化配置研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9):901-909.
- LOU Ping, ZHANG Lei, LIU Ying, et al. Research on optimal configuration of energy storage system considering comprehensive resilience and economy of distribution network [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(9):901-909.
- [17] SAVKIN A V, KHALID M, AGELIDIS V G. A constrained monotonic charging/discharging strategy for optimal capacity of battery energy storage supporting wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1224-1231.
- [18] LI X, WANG S. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5):1026-1040.
- [19] 周立立, 向月, 陈凌天. 基于风险-收益分析的用户侧储能容量经济配置研究[J]. 中国电力, 2021, 54(9):187-197.
- ZHOU Lili, XIANG Yue, CHEN Lingtian. Research on economic allocation of user-side energy storage capacity based on risk-benefit analysis [J]. Electric Power, 2021, 54(9):187-197.

[20] 茆美琴, 洪嘉玲, 张榴晨. 考虑光伏出力预测误差修正的储能优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 410-416.

MAO Meiqin, HONG Jialing, ZHANG Liuchen. Energy storage optimization configuration method considering conditional forecast error correction [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(2):410-416.

(本文责编: 张帆)

收稿日期: 2022-10-29; 修回日期: 2023-01-09

上网日期: 2023-05-08; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

刘子祺(1999), 男, 在读硕士研究生, 从事储能系统优化配置与运行方面的研究, ziqi.liu.647@hotmail.com;

苏婷婷(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事新型电力系统稳定性分析与控制方面的研究, tingting.su2022@hotmail.com;

何佳阳(1999), 男, 在读硕士研究生, 从事双有源全桥直流固态变流器方面的研究, jiaayang\_he@hotmail.com;

王裕\*(1984), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 从事新能源发电与储能系统、电力电子与柔性直流输配电技术方面的研究, yuwang@gdut.edu.cn。

\*为通信作者。

\*\*\*\*\*

广告索引

郑州科润机电工程有限公司 ..... (后插 1)	郑州华电能源科技有限公司(跨版) ..... (后插 10,11)
华电水务科技股份有限公司(跨版) ..... (后插 2,3)	华电重工股份有限公司(跨版) ..... (后插 12,13)
华电环保系统工程有限公司(跨版) ..... (后插 4,5)	中国华电科工集团有限公司能源建设
中国华电科工集团有限公司新能源	分公司(跨版) ..... (后插 14,15)
技术开发公司 ..... (后插 6)	华电科工安全环境质量科学研究所 ..... (后插 16)
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术	山东华电节能技术有限公司 ..... (后插 17)
研发(实验)中心 ..... (后插 7)	公益广告(降碳节能) ..... (后插 18)
华电综合智慧能源科技有限公司 ..... (后插 8)	华电郑州机械设计研究院有限公司 ..... (封三)
华电通用轻型燃机设备有限公司 ..... (后插 9)	中国华电科工集团有限公司 ..... (封底)