

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211106

# 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置

闫群民<sup>1</sup>, 董新洲<sup>1,2</sup>, 穆佳豪<sup>1</sup>, 马永翔<sup>1</sup>

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 储能系统可解决分布式电源加入配电网所产生的不良影响, 而储能系统的合理配置是其有效应用的前提。以电网脆弱性衡量指标、有功网损、储能额定容量三个方面, 考虑规划与运行之间的耦合性建立储能系统在有源配电网中的多目标选址定容模型。提出改进的多目标粒子群算法用于求解。该算法在种群更新过程中引入准对立学习策略以增强解的覆盖范围和收敛速度, 并根据迭代次数采用自适应分裂策略分离过早聚集的粒子, 从而增强粒子多样性, 保证了算法跳出局部最优的能力。通过在 IEEE33 节点配电系统上进行分析, 验证了所提模型及算法在优化分布式储能选址定容及运行策略中的合理性, 并能有效改善电网的运行经济性与脆弱性, 具有更强的全局寻优能力。

**关键词:** 储能系统; 优化配置; 有源配电网; 电网脆弱性; 多目标粒子群算法

## Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization

YAN Qunmin<sup>1</sup>, DONG Xinzhou<sup>1,2</sup>, MU Jiahao<sup>1</sup>, MA Yongxiang<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The use of energy storage systems (ESS) can guard against many hazards caused by distributed power sources joining the distribution network, and the reasonable configuration of ESS is a prerequisite for their effective application. In this paper, considering the coupling between planning and operation, a multi-objective site selection and capacity model for ESS in a distribution network with distributed generation (DG) is established from three aspects: grid vulnerability measurement indicators, active power loss, and ESS-rated capacity. A reformative multi-objective particle swarm arithmetic is devised. The arithmetic introduces a quasi-adversarial learning strategy in the population update process to enhance the coverage and convergence rate of the solution, and adopts an adaptive split strategy to separate prematurely clustered particles according to the number of iterations, thereby enhancing the diversity of particles. This has the ability to escape the local optimum while ensuring astringency. Through analysis on the IEEE-33 node power distribution system, the rationality of the proposed model and algorithm in optimizing the location and capacity and operational strategy of distributed energy storage is verified, and it can effectively improve the operating economy and vulnerability of a power grid with a stronger global search capability.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

**Key words:** energy storage system; optimal configuration; active distribution network; grid vulnerability; multi-objective particle swarm optimization

## 0 引言

以光伏和风电为代表的分布式电源(Distributed

Generation, DG)在配电网中迅速发展<sup>[1-4]</sup>。而大规模 DG 加入配电网后难以实现就地平衡, 增加了源荷之间的供需不平衡性<sup>[5]</sup>, 进而导致配电网出现电压波动加剧、部分节点电压偏移严重、线路损耗增大等问题<sup>[6-7]</sup>, 在配电网侧引入储能系统(Energy Storage System, ESS)可解决上述问题。而储能能在电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600);  
陕西省教育厅重点科学研究计划项目资助(20JS018)

网中必须以安全性为前提进行应用<sup>[8]</sup>, 储能系统接入位置、容量的选择和相应的运行策略与配电网的稳定经济运行密不可分, 若不对其进行合理的优化配置, 则相当于给配电网增加很多扰动电源, 反而不利于电网的安全稳定运行<sup>[9-10]</sup>。

目前国内外储能优化配置主要考虑两部分, 目标函数和求解算法。在目标函数方面, 大都考虑经济性因素, 主要包括投资成本、运维成本及线路损耗成本等<sup>[11-12]</sup>, 也有部分文献考虑储能所带来的社会效益。文献[13]在配置储能容量的目标函数中, 对各项利益成本进行建模的同时还考虑了环境效益, 但只对固定位置进行容量优化。文献[14]同时考虑经济、技术标准及 DG 的不确定性, 建立了用于求解分布式储能最佳容量及功率的多目标优化模型。但储能的接入对配电网的脆弱性有很大的影响, 目前很少有关于储能系统的接入对电网本身脆弱性的影响的研究, 因此有必要建立包含电网运行经济性与脆弱性的综合效益目标函数。在求解算法方面, 储能优化配置本身是一个多目标优化问题<sup>[15]</sup>, 多目标粒子群优化算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)因其收敛速度快, 参数设置简便的优点在最优化问题求解中广泛运用。在储能优化配置中为简化计算并提高收敛精度, 文献[16]提出一种改进 MOPSO 算法来求解微网储能配置的双层规划模型, 采用最优相似度自适应调节惯性权重的取值, 并对某些粒子进行交叉变异, 同时为保证 Pareto 解集的均匀性对其采用动态更新策略。文献[17]提出基于拥挤距离排序的改进 MOPSO 算法, 采用基于变异机制的二次寻优来跳出局部最优, 并通过模糊隶属度函数选取最优解。文献[18]构造了一种混合概率优化算法求解储能选址定容问题, 该算法将离散化方法与 MOPSO 算法和非支配排序遗传算法相结合, 能够实现更好的电压分布并减小网损。上述研究中大多将储能的布点规划和容量规划问题分别处理, 忽略了它们之间对电能质量影响的耦合性。其次, 虽然在求解各自储能配置数学模型中表现出有效性, 但这些改进算法在处理特定的高维非线性多目标储能优化配置问题中仍存在算法求解精度不够、稳定性不足的问题<sup>[19]</sup>, 因此仍需对 MOPSO 算法的寻优过程进行改进, 以提高算法的收敛性能。

本文提出一种考虑电网脆弱性和经济性的有源配电网储能系统优化配置方法, 并针对标准 MOPSO 算法粒子过早聚集致使多样性差且易落入局部最优的缺陷进行改进, 将准对立学习策略与自适应粒子分裂策略与原算法有机结合。考虑储能、

DG、负荷时序特性, 以电网脆弱性衡量指标、有功网损、储能额定容量最小为目标, 在有功平衡约束及储能约束的限制下, 采用改进的 MOPSO 算法对储能系统的容量及位置进行优化, 同时优化储能的最佳运行策略。通过算例分析, 结果表明该方法所得到的位置容量大小及各时刻储能的充放电功率可有效减小电网脆弱性、降低系统网损、减少储能配置成本, 且收敛性能更强。

## 1 电网脆弱性衡量指标的构建

为了定量表示储能加入电网侧对电能质量的改善程度, 文中提出的电网脆弱性指标是从电网运行安全性方面入手的状态脆弱性指标。该指标通过分析各节点电压偏移标准值的程度来衡量电网抗风险能力, 提高电能质量。脆弱性越高, 该节点电压越不稳定, 供电电能质量越低, 抗风险能力越差<sup>[20]</sup>。 $t$ 时刻网络中任一节点  $i$  的脆弱性表示为

$$v(t, i) = \frac{\left| \frac{U_{t,i}}{U_{i,o}} - 1 \right|}{0.07} \quad (1)$$

式中:  $U_{t,i}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的电压;  $U_{i,o}$  为节点  $i$  的额定电压; 0.07 为最大电压偏移量。

将其在  $t$  时间断面归一化如下。

$$V(t, i) = \frac{v(t, i) - v(t, i_{\min})}{v(t, i_{\max}) - v(t, i_{\min})} \quad (2)$$

式中,  $v(t, i_{\max})$ 、 $v(t, i_{\min})$  为归一化前  $t$  时刻所有节点最大、最小脆弱性值。

$t$  时刻电网平均脆弱性为

$$BV(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(t, i) \quad (3)$$

式中:  $N$  为系统节点总数;  $V(t, i)$  为时间断面  $t$  各节点脆弱性的归一化值。

由于任意一节点电压崩溃会引起其他节点崩溃的连锁反应, 所以电网脆弱性指标还必须考虑各节点脆弱性分布的均衡性。为此采用均衡指数法来表示电网脆弱性的均衡度  $J$ , 范围为 0~1, 0 代表绝对均衡, 1 代表绝对不均衡。 $t$  时刻均衡度为

$$J(t) = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N p_{t,i} \log_2 \left( \frac{1}{p_{t,i}} \right)}{\log_2 N} \right]^{2\pi} \quad (4)$$

式中,  $p_{t,i}$  为  $t$  时刻节点  $i$  脆弱性占当前时刻电网总脆弱性之比, 表达式为

$$P_{t,i} = \frac{V(t,i)}{\sum_{i=1}^N V(t,i)} \quad (5)$$

最后将时间断面  $t$  下电网平均脆弱性指标和均衡度指标赋权重相加(文中权重各取 0.5), 再对其求一天 24 h 的均值即可得到最终的电网脆弱性衡量指标  $GV$  为

$$GV = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{1}{2} BV(t) + \frac{1}{2} J(t) \right) \quad (6)$$

$GV$  通常介于 0 到 1 之间。 $GV$  指标越靠近 1, 电网整体脆弱性越高, 供电安全性越差;  $GV$  指标越靠近 0, 供电安全性越高。

## 2 多目标储能规划数学模型

### 2.1 目标函数

储能容量和布点的规划是一个多目标优化问题。储能的合理规划将会降低大量 DG 接入对中低压配电网安全性的威胁, 提高电能质量并能改善潮流分布从而减少网损提高电网运行经济性<sup>[21-22]</sup>。但因目前电池储能系统的安装运维成本较高, 所以在储能的规划期就有必要考虑其成本因素, 因此文中综合考虑储能对配电网的效益及其成本, 采用以下三个指标来衡量储能的规划是否合理。

#### 1) 电网脆弱性衡量指标

在保证电网运行安全性的前提下接入储能, 采用第 1 节提到的脆弱性指标作为目标函数之一。

$$f_1 = GV \quad (7)$$

#### 2) 有功网损

储能系统在配电网中可等效为电源或者负荷, 其调节作用可减小馈线中电流的流动, 进而使配电网有功网损减小从而提升经济性<sup>[23]</sup>。日有功网损为

$$f_2 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in M_L} [G_{ij} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \delta_{ij,t})] \quad (8)$$

式中:  $M_L$  为网络的所有支路;  $G_{ij}$  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。

#### 3) 储能额定容量

考虑储能配置的经济性, 采用储能总容量为目标函数之一, 储能额定容量为一个测试周期内最大充/放电容量。

$$W_j = \max \left\{ \sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} |p_{\text{store},j}(t)| \cdot \Delta t \right\} \quad (9)$$

$$f_3 = \sum_{j=1}^{N_{\text{store}}} W_j \quad (10)$$

式中:  $t_0$  为初始时刻;  $t_0$  到  $t_0+n\Delta t$  为各充/放电时间段;  $p_{\text{store},j}(t)$  为第  $j$  个储能  $t$  时刻的功率;  $\Delta t$  为充/放电持续时间。

综合考虑电网脆弱性衡量指标、有功网损和储能容量, 储能优化配置的多目标优化函数为

$$\min F = \min(f_1, f_2, f_3) \quad (11)$$

### 2.2 约束条件

#### 1) 有功平衡约束, 即

$$P_{\text{grid}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG},i}(t) + \sum_{j=1}^{N_{\text{store}}} P_{\text{store},j}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (12)$$

式中:  $p_{\text{grid}}(t)$  为  $t$  时刻流入网络的有功功率;  $N_{\text{DG}}$ 、 $N_{\text{store}}$  分别为 DG、储能安装个数;  $p_{\text{DG},i}(t)$  为第  $i$  个 DG 在  $t$  时刻的有功功率;  $p_{\text{store},j}(t)$  为第  $j$  个储能在  $t$  时刻的充/放电功率, 放电为正;  $p_{\text{load}}(t)$ 、 $p_{\text{loss}}(t)$  分别为  $t$  时刻系统总负荷和总网损。

#### 2) 储能约束, 即

$$\begin{cases} p_{\text{store},j}^{\min} \leq p_{\text{store},j}(t) \leq p_{\text{store},j}^{\max} \\ \text{if } p_{\text{store},j}(t) \leq 0, \\ E_{\text{store},j}(t) = E_{\text{store},j}(t-1)(1-\delta) + p_{\text{store},j}(t)\eta_c \Delta t \\ \text{if } p_{\text{store},j}(t) > 0, \\ E_{\text{store},j}(t) = E_{\text{store},j}(t-1)(1-\delta) - \frac{p_{\text{store},j}(t)}{\eta_d} \Delta t \\ 0.2 \leq SOC_j(t) \leq 0.9 \\ SOC_j(0) = 0.5 \\ \sum_{t=1}^T \left[ p_{\text{store},j}(t)a_1\eta_c + p_{\text{store},j}(t)\frac{a_2}{\eta_d} \right] \Delta t = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $p_{\text{store},j}^{\max}$ 、 $p_{\text{store},j}^{\min}$  分别为第  $j$  个储能充/放电功率的上、下限;  $E_{\text{store},j}(t)$  为  $t$  时刻储能  $j$  的容量;  $\delta$  为自放电电流率;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  为储能充/放电效率;  $SOC_j(t)$  为  $t$  时刻储能  $j$  的荷电状态, 为防止储能过充过放影响寿命, 设定其范围为 0.2~0.9, 且在一个运行周期内的始末时刻均保持为 0.5;  $a_1$ 、 $a_2$  表示储能充放电状态, 当  $p_{\text{store},j}(t) \leq 0$  时储能充电,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 0$ ; 当  $p_{\text{store},j}(t) > 0$  时储能放电,  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 1$ 。

## 3 多目标储能规划求解算法

在多目标优化算法中, MOPSO 算法以其参数设置简单且收敛速度快的优点得以广泛应用<sup>[24]</sup>。但标准 MOPSO 在求解多目标储能规划问题时存在如

下问题: 1) 算法的收敛精度及速度受随机初始解的影响较大; 2) 粒子的学习机制使大量粒子过快地聚集, 种群多样性快速缺失易陷入局部最优, 同时 Pareto 解集的分布性变差<sup>[25]</sup>。因此文中对标准 MOPSO 做出改进, 在原种群更新过程中引入准对立学习策略以扩大解空间的覆盖范围, 并引入自适应粒子分裂策略, 根据迭代次数分离过早聚集的粒子以改善种族特性, 在保证后期收敛性的同时避免算法陷入局部最优。

### 3.1 标准 MOPSO

在粒子群算法中各个粒子都是备选解, 并根据全局最优及个体最优值在  $d$  维解空间中改变自己的位置, 不断接近最优解<sup>[26]</sup>。速度及位置更新策略如式(14)、式(15)。

$$v_i(k+1) = wv_i(k) + c_1r_1(x_{pbesti}(k) - x_i(k)) + c_2r_2(x_{gbest}(k) - x_i(k)) \quad (14)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (15)$$

式中:  $i$  为粒子编号;  $k$  为当前迭代次数;  $x_{pbesti}(k)$  为粒子  $i$  到第  $k$  代为止最佳的位置;  $x_{gbest}(k)$  为所有粒子到第  $k$  代为止最佳的位置;  $c_1$ 、 $c_2$  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]中的随机常数;  $w$  为惯性权重, 在实际使用中为调节算法的探索与开采能力常根据迭代次数  $k$  采用线性递减的  $w$  值, 公式为

$$w(k) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (16)$$

式中:  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  为惯性权重的上下限值;  $k_{\max}$  为迭代次数最大值。

### 3.2 改进 MOPSO

#### 1) 准对立学习策略

MOPSO 同其他进化算法一样, 其种群的初始化解单纯地在各决策变量要求的上下限范围内随机取值<sup>[27]</sup>, 然而随机的初始解可能离全局最优解的距离非常远, 不利于算法的收敛精度及速度。准对立学习策略(Quasi-Opposition based Learning, QOBL)<sup>[28-29]</sup>是改善种群特性的一种优化策略, 该策略的基本思想是在原种群的基础上生成一个准对立种群增加解空间的覆盖范围, 择优选择适应度高的个体进入下一次迭代, 从而更易得到全局最优解。

对立点为可行域内某个解关于搜索空间中心的镜像点, 对于  $d$  维搜索空间, 对立点的定义为

$$x_i^o = lb_i + ub_i - x_i \quad (17)$$

式中:  $x_i$  为粒子第  $i$  维决策变量的取值, 其中  $i=1,2,\dots,d$ ;  $ub_i$ 、 $lb_i$  为第  $i$  维变量取值的上下限,  $x_i \in [lb_i, ub_i]$ ;  $x_i^o$  为粒子  $x_i$  的对立点。

准对立点为搜索空间中心点与对立点之间的一个点, 通常比对立点更接近全局最优解, 其定义为

$$x_i^{qo} = \text{rand}[(lb_i + ub_i)/2, x_i^o] \quad (18)$$

式中,  $\text{rand}[(lb_i + ub_i)/2, x_i^o]$  为  $(lb_i + ub_i)/2$  与  $x_i^o$  之间均匀分布的随机点。

文中在 MOPSO 的种群更新过程中引入准对立学习策略, 得到准对立种群并与初始种群结合形成混合种群, 根据粒子的支配关系和拥挤距离排序选择适应度高的前一半个体放入原种群的对应位置中进入下一次迭代。能够改善种群特性, 使之更有可能在贴紧全局最优解的同时增强收敛速度。

#### 2) 自适应粒子分裂策略

MOPSO 中搜索粒子会不断朝着历史和全局最优粒子飞行。这一特性使算法能够快速收敛, 但搜索粒子过快的聚集不仅会产生很多距离较近无效解, 还会因为多样性的快速下降致使算法落入局部最优<sup>[30]</sup>。为解决这一局限性, 文中将天体物理学中的“分裂算子”<sup>[31]</sup>引入算法中, 利用引力理论在迭代过程中自适应分裂过渡聚集的粒子群来增强种群的多样性, 避免局部最优的问题。分裂条件为

$$\begin{cases} L_{i,j} < S \\ L_{i,gbest} \\ S = S_0(1 - \frac{k}{k_{\max}}) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $L_{i,j}$  为粒子  $i$  和其最近的粒子  $j$  在以目标函数值为坐标的  $m$  维空间( $m$  为目标函数的个数)的欧氏距离;  $L_{i,gbest}$  为粒子  $i$  与种群最优粒子在  $m$  维空间中的欧氏距离;  $S$  为随着迭代次数线性递减的分裂阈值, 算法前期没有收敛时  $S$  很大以便扩大搜索范围, 而在后期接近全局最优解时  $S$  减小以充分利用最优解信息增强算法快速收敛性;  $S_0$  为初始阈值;  $k$  为目前迭代次数;  $k_{\max}$  为迭代次数最大值。

若某粒子满足分裂条件, 则按式(20)的分裂策略对粒子位置进行更新。

$$x_i(k) = \frac{k}{k_{\max}} x_i(k) + D(1 - \frac{k}{k_{\max}}) x_i(k) \quad (20)$$

式中:  $x_i(k)$  为  $k$  次迭代后粒子  $i$  的位置;  $D$  为动态分裂算子, 公式为

$$D = \begin{cases} L_{i,j} \times \text{rand}(-1/2, 1/2), & \text{if } L_{i,gbest} \geq e^{-k/k_{\max}} \\ L_{i,j} \times \rho(1 + \text{rand}(-1/2, 1/2)), & \text{other} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\text{rand}(-1/2, 1/2)$  为分布在区间  $[-1/2, 1/2]$  上的伪随机数;  $e^{-k/k_{\max}}$  为自适应分支阈值;  $\rho$  为一个很小的数, 用于开发搜索空间。

在算法初期粒子与最优粒子距离较远,  $L_{i,gbest}$  较大, 即  $L_{i,gbest} \geq e^{-k/k_{max}}$ , 使得  $D$  值大, 分裂策略以分裂项( $D$  乘递减系数  $(1-k/k_{max})$ )为主, 以增强粒子多样性, 避免局部最优; 后期粒子靠近全局最优解  $L_{i,gbest}$  较小, 即  $L_{i,gbest} < e^{-k/k_{max}}$ , 使得  $D$  值较小, 分裂策略转换为以粒子本身位置项(递增系数  $k/k_{max}$ )为主, 保证算法小范围精细搜索能力。通过自适应改变  $D$  的取值, 使算法初期全局寻优能力强并在后期逐步增强局部寻优性能, 增强了算法收敛性能。

### 3.3 算法流程

本文根据式(7)一式(13)所构建的优化模型, 采用 Matlab 语言编写改进的 MOPSO 算法进行仿真。决策变量由两个储能的位置、容量大小及其一天内各时刻的充放电功率构成, 共 52 维, 首先根据式(13)中储能充放电功率的约束及其在网络中的位置约束随机生成一天之内的充放电功率及其位置信息, 利用式(9)的最大区间法求得储能的额定容量, 根据式(13)求取储能系统各时刻的容量进而得到 SOC 曲线, 并判断其是否满足约束, 据此实时修改 IEEE33 节点的网络拓扑并调用 Matpower 进行潮流计算, 以三个目标函数值最小为量化考核指标来判断当前方案的好坏, 通过改进的 MOPSO 算法对控制变量进行反复迭代, 最终求得储能的最佳接入位置、容量以及充放电功率曲线。求解多目标储能选址定容规划流程如图 1 所示。

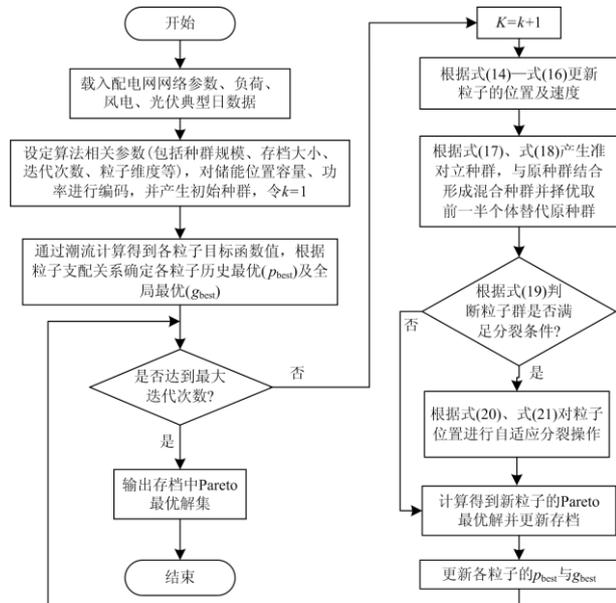


图 1 多目标储能选址定容规划求解流程

Fig. 1 Multi-objective energy storage site selection and capacity planning and solution process

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数

本文在 IEEE33 节点配电系统上进行仿真, 如图 2 所示。该配电网的基准电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MVA, 图 3、图 4 分别为典型日负荷曲线和典型日光伏及风机出力曲线。

仿真中储能允许接入位置为 2~33, 接入个数为 2, 在节点 9、30 接入 200 kW 光伏, 14、20 接入 200 kW 风机, 其余参数设置如表 1 所示。

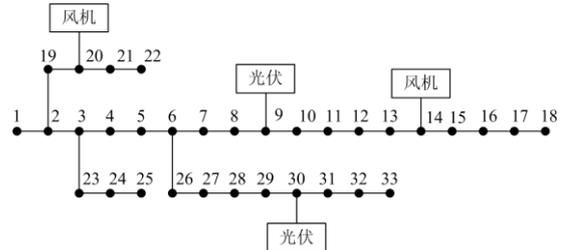


图 2 IEEE33 节点配电系统

Fig. 2 IEEE33 node distribution system

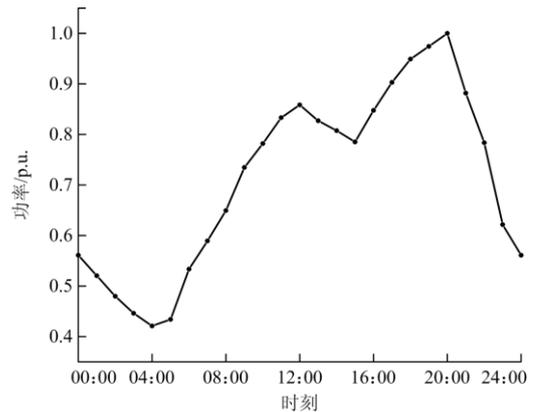


图 3 典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve

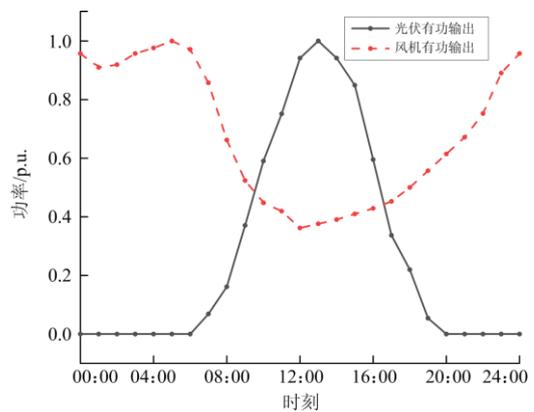


图 4 典型日光伏及风机出力曲线

Fig. 4 Typical daily output curve of renewable generation

表 1 仿真参数设置

参数类型	取值
最大迭代次数	50
初始种群个数	50
惯性权重范围	0.4-0.9
物理 SOC 范围	0.2-0.9
最大 Pareto 解集规模	200
充放电效率 $\eta$	90%
自放电电流率 $\delta$	0.1%
个体学习因子 $c_1$	1.49
全局学习因子 $c_2$	1.49

4.2 优化结果

为验证所提模型及算法的有效性，分为三个不同场景进行比较。场景 1，不接入储能；场景 2，接入储能，采用标准 MOPSO 算法优化；场景 3，接入储能，采用改进 MOPSO 算法优化。由于最优解集规模较大，文中根据电网脆弱性指标大小排序，列出前 5 个 Pareto 最优解进行分析。不同场景下的优化结果如表 2 所示。此外，在场景 3 下进一步分析单点储能接入时的优化结果，如表 3 所示。

从表 2 可以看出，场景 2 电网均衡指标  $f_1$  和有功网损  $f_2$  平均值为 0.376 8、1.142 6 MW，相较于优化前分别平均削减 8.9%、9.1%。而场景 3 的  $f_1$ 、 $f_2$  均值分别为 0.342 2、1.046 1 MW，比优化前减少了 17.3%、16.7%。场景 3 的储能额定容量也普遍比场景 2 少，经济性较好。对比表 2 中场景 3 的多点储能目标函数平均值与表 3 的单点储能目标函数平均

表 2 不同场景下的优化结果

场景	储能接入位置及 (容量/MWh)	$f_1$	$f_2$ /MW	$f_3$ /MWh
1	—	0.413 6	1.256 5	—
2	16(0.828 5)、18(0.962 7)	0.367 3	1.124 0	1.791 2
	14(1.006 1)、18(0.724 9)	0.373 5	1.148 7	1.731 0
	12(0.887 2)、21(0.802 5)	0.377 6	1.143 0	1.689 7
3	14(0.925 4)、31(0.690 2)	0.380 1	1.137 5	1.615 6
	9(0.840 7)、20(0.839 2)	0.385 7	1.160 0	1.821 9
	6(0.779 7)、14(0.695 2)	0.349 5	1.038 9	1.474 9
平均值	—	0.376 8	1.142 6	1.729 9
3	17(0.848 1)、33(0.795 2)	0.332 6	1.055 5	1.643 3
	18(0.930 2)、30(0.685 3)	0.338 6	1.048 4	1.615 5
	14(0.889 7)、33(0.869 2)	0.343 2	1.047 6	1.758 9
3	9(0.927 3)、15(0.709 2)	0.347 3	1.040 1	1.636 5
	6(0.779 7)、14(0.695 2)	0.349 5	1.038 9	1.474 9
	平均值	—	0.342 2	1.046 1

表 3 场景 3 下单点储能优化结果

储能接入位置及 (容量/MWh)	$f_1$	$f_2$ /MW	$f_3$ /MWh
6(1.315 0)	0.375 1	1.171 2	1.315 0
18(1.095 1)	0.379 5	1.163 8	1.095 1
9(1.186 6)	0.386 9	1.153 6	1.186 6
14(1.272 3)	0.395 2	1.105 7	1.272 3
6(1.392 5)	0.398 5	1.041 2	1.392 5
平均值	—	0.387 0	1.127 1

值可以看出，单点储能虽然在配置容量上小于多点储能，但其对网络脆弱性指标和网损的改善程度却低于多点储能，对电网的运行安全性提升不明显。可以看出，改进 MOPSO 算法在解决储能选址定容问题上，各目标值均优于基本 MOPSO 算法，更易得到全局最优解。选取场景 3 个具有代表性的最优解，其储能的安装位置及容量为 6(0.779 7)、14(0.695 2)，优化后的储能运行策略及 SOC 曲线如图 5、图 6 所示。

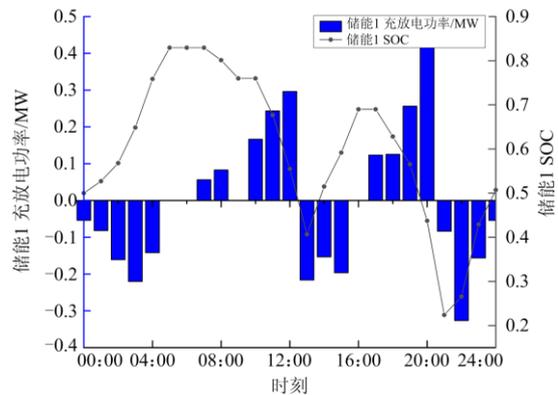


图 5 6 节点储能运行策略及 SOC 曲线

Fig. 5 6-node ESS operation strategy and SOC curve

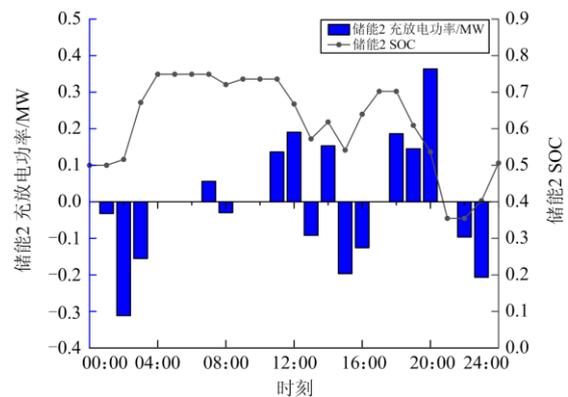


图 6 14 节点储能运行策略及 SOC 曲线

Fig. 6 14-node ESS operation strategy and SOC curve

由图 5、图 6 并结合典型日 DG 及负荷曲线可以看出, 两储能的运行规律大致相同, 均在负荷低谷期且风电高峰期(00:00—05:00)将多余的电能储存起来减少弃风防止功率倒送, 利于 DG 的消纳; 并在负荷高峰期(12:00 和 20:00)附近将能量释放出来给电网提供功率支撑。其余时段储能根据最大充放电功率及 SOC 的限制(0.2~0.9)自由进行充放电, 维持自身能量水平防止过充过放, 利于储能寿命。且储能一天始末时间 SOC 均保持 0.5, 有利于下一周期的运行。

以 14 节点为例, 储能配置前后系统负荷曲线对比如图 7 所示。

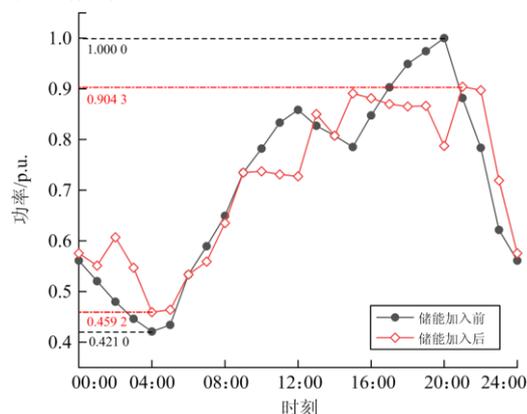


图 7 储能配置前后系统负荷曲线

Fig. 7 System load curve before and after ESS configuration

由图 7 可以看出, 未加储能时峰谷差为 0.579 0 p.u., 负荷平均值为 0.711 4 p.u., 加入文中优化的储能后峰谷差为 0.445 1 p.u., 负荷平均值为 0.711 0 p.u.。文中所提优化的储能运行策略还具有一定的削峰填谷作用。

## 5 结语

文中从改善有源配电网脆弱性和经济性的角度出发, 并考虑储能规划与运行之间的耦合性, 提出了一种分布式储能优化配置方法。以电网脆弱性衡量指标、有功网损以及储能额定容量建立多目标储能优化配置模型, 以改进的 MOPSO 算法求解得到有源配电网中 ESS 的最优位置信息、容量大小和相应的运行策略。通过在 Matlab 中对 IEEE33 节点配电系统的算例分析验证了文中方法的有效性, 结果表明:

1) ESS 优化模型中考虑了电网脆弱性, 在优化储能选址定容以及运行策略的同时提高了电网的安全性。由算例分析结果可知, 该方法可确定各储能合理的接入位置、容量及充放电策略, 并且由于约

束条件中包含了储能自身的运行限制, 所优化的 ESS 可维持自身能量水平, 储能各时刻 SOC 水平均维持在 0.2~0.9 之间, 有效防止过充过放, 利于储能寿命, 同时接入储能后系统负荷峰谷差由 0.579 0 p.u. 降到 0.445 1 p.u., 具有一定的削峰填谷作用, 有利于提高有源配电网中 DG 的消纳水平。

2) 将准对立学习策略以及自适应粒子分裂策略融入原算法, 提出的改进 MOPSO 算法可解决标准 MOPSO 算法对初始解依赖较强和易陷入局部最优解等问题。算例分析结果也表明该算法相较于原算法全局寻优能力更强, 可以有效降低电网脆弱性、有功网损及储能额定容量大小, 其中电网脆弱性指标下降了 8.4%, 有功网损减少了 7.6%, 储能配置容量大小可减少 6.0%, 有效改善了有源配电网的运行安全性与经济性。

## 参考文献

- [1] 苗友忠, 李顺昕, 雷为民, 等. 考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 93-99.  
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [2] 张颖, 寇凌峰, 季宇, 等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 104-112.  
ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 104-112.
- [3] 邢海军, 谢宝江, 秦建, 等. 考虑 CVR 的主动配电网优化运行方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 76-81.  
XING Haijun, XIE Baojiang, QIN Jian, et al. Active distribution network optimal operation considering conservation voltage reduction[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 76-81.
- [4] 唐成虹, 李淑锋, 陈永华, 等. 计及分布式电源的主动配电系统状态估计[J]. 广东电力, 2021, 34(3): 60-67.  
TANG Chenghong, LI Shufeng, CHEN Yonghua, et al. State estimation of active distribution system considering DGs[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 60-67.
- [5] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.  
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A

- review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [6] 寇凌峰, 张颖, 季宇, 等. 分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 177-187.  
KOU Lingfeng, ZHANG Ying, JI Yu, et al. Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 177-187.
- [7] 王成山, 武震, 李鹏, 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8.
- [8] 张明霞, 闫涛, 来小康, 等. 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1370-1377.  
ZHANG Mingxia, YAN Tao, LAI Xiaokang, et al. Technology vision and route of energy storage under new power grid function configuration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1370-1377.
- [9] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.  
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [10] JIANG Y, KANG L, LIU Y. Optimal configuration of battery energy storage system with multiple types of batteries based on supply-demand characteristics[J]. Energy, 2020, 206.
- [11] 彭春华, 陈露, 张金克, 等. 基于分类概率机会约束 IGDT 的配网储能多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2809-2819.  
PENG Chunhua, CHEN Lu, ZHANG Jinke, et al. Multi-objective optimal allocation of energy storage in distribution network based on classified probability chance Constraint information gap decision theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2809-2819.
- [12] LI Ruisheng, PETER W, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [13] 刘文霞, 牛淑娅, 石道桂, 等. 考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2697-2704.  
LIU Wenxia, NIU Shuya, SHI Daogui, et al. Optimal allocation of ADS battery energy storage considering operation strategy and investment subject benefit[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2697-2704.
- [14] GARMABDARI R, MOGHIMI M, YANG F, et al. Multi-objective energy storage capacity optimisation considering microgrid generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119.
- [15] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.  
TAO Qiong, SANG Bingyu, YE Jilei, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] AHMAD A, SIRJANI R. Optimal allocation of energy storage system in transmission system considering wind power[C] // 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2020), April 14-16, 2020, Antalya, Turkey.
- [19] 白浩, 于力, 梁朔, 等. 计及多级配电网运行效率提升价值的电网侧储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 7-13.  
BAI Hao, YU Li, LIANG Shuo, et al. Optimized configuration of grid-side energy storage considering the value of multi-stage distribution network operation efficiency improvement[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 7-13.

- [20] 徐行, 李华强, 赵祥云, 等. 基于运行状态和网络结构的节点综合脆弱性评估[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 731-735.  
XU Xing, LI Huaqiang, ZHAO Xiangyun, et al. Assessment on nodal comprehensive vulnerability based on operational state and network structure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 731-735.
- [21] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.  
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [22] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 53-64.  
TANG Jie, LÜ Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 53-64.
- [23] 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.
- [24] 姜欣, 郑雪媛, 胡国宝, 等. 市场机制下面向电网的储能系统优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4601-4610.  
JIANG Xin, ZHENG Xueyuan, HU Guobao, et al. Optimization of battery energy storage system locating and sizing for the grid under the market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4601-4610.
- [25] 蔡博, 黄少锋. 基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 77-84.  
CAI Bo, HUANG Shaofeng. Multi-objective reactive power optimization based on the multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 77-84.
- [26] 路小娟, 郭琦, 董海鹰. 基于 CMOPSO 的混合储能微电网多目标优化研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 279-286.  
LU Xiaojuan, GUO Qi, DONG Haiying. Multi objective optimization of hybrid energy storage micro grid based on CMOPSO algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(1): 279-286.
- [27] WANG B, ZHOU M, XIN B, et al. Analysis of operation cost and wind curtailment using multi-objective unit commitment with battery energy storage[J]. Energy, 2019, 178: 101-114.
- [28] BASU M. Quasi-oppositional differential evolution for optimal reactive power dispatch[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 29-40.
- [29] 王亚东, 石全, 尤志锋, 等. 差分准对立学习多目标蚁狮算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(13): 156-163.  
WANG Yadong, SHI Quan, YOU Zhifeng, et al. Differential evolutionary quasi-oppositional multi-objective ant lion optimizer[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(13): 156-163.
- [30] 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.
- [31] ZHANG R, TIAN F, REN X, et al. Associate multi-task scheduling algorithm based on self-adaptive inertia weight particle swarm optimization with disruption operator and chaos operator in cloud environment[J]. Service Oriented Computing and Applications, 2018, 12(2): 87-94.

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-11-07

作者简介:

闫群民(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 教授, 研究方向为电力系统分析与电能质量控制; E-mail: yanqunm@163.com

董新洲(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, IET Fellow, 研究方向为电力系统分析与继电保护; E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

穆佳豪(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析及新能源发电。E-mail: 1072177136@qq.com

(编辑 葛艳娜)