

# 基于改进 FPA 算法的含分布式光伏配电网选址 定容多目标优化方法

陈德炜<sup>1</sup>, 施永明<sup>1</sup>, 徐威<sup>1</sup>, 肖云佳<sup>1</sup>, 吴田<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 近年来配电网分布式光伏数量不断增加, 不合理的分布式光伏接入位置和容量给配电网带来了极大的冲击。针对分布式光伏接入位置和容量不合理给配电网带来的影响, 提出了一种以投资成本最低、网损最小、电压质量最优为优化目标的选址定容模型。结合遗传算法、混沌序列和花授粉算法求解优化模型。通过混沌序列对花粉位置进行初始化, 保证种群的多样性。在花授粉算法局部最优时, 最优解被用作遗传算法的初始参数进行选择、交叉、变异来更新种群, 保持种群的多样性, 提高算法的寻优能力。通过仿真对所提方法的可行性进行验证。结果表明, 改进算法的收敛性明显提高, 从改进前 300 次提升到改进后 40 次迭代后开始收敛。优化配置后, 电压效应较差的节点和损耗都得到了明显改善。该研究为含分布式电源的配电网选址定容提供一定的参考和借鉴。

**关键词:** 配电网; 花授粉算法; 混沌序列; 遗传算法; 分布式光伏; 选址定容

## Multi-objective optimization method for location and capacity of a distribution network with distributed photovoltaic energy based on an improved FPA algorithm

CHEN Dewei<sup>1</sup>, SHI Yongming<sup>1</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, XIAO Yunjia<sup>1</sup>, WU Tian<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In recent years, with the increasing amount of distributed PV in distribution network, unreasonable distributed photovoltaic access location and capacity has a large negative impact on the distribution network. Given this impact, a location and capacity model with the optimization objectives of minimum investment cost, minimum network loss and optimal voltage quality is proposed. The optimization model is solved by combining a genetic algorithm, a chaotic sequence and flower pollination algorithm. The pollen position is initialized by chaotic sequence to ensure population diversity. When the flower pollination algorithm is locally optimal, the optimal solution is used as the initial parameter of the genetic algorithm to select, cross and mutate to update the population, maintain the diversity of the population and improve the optimization ability of the algorithm. The feasibility of this method is verified by simulation. The results show that the convergence of the improved algorithm is significantly improved, from 300 iterations before the improvement to 40 iterations after the improvement. After the optimal configuration, the nodes and losses with poor voltage effect are significantly improved. This study provides a reference for the location and capacity of a distribution network with distributed generation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 5187665744).

**Key words:** distribution network; flower pollination algorithm; chaos sequence; genetic algorithm; distributed photovoltaic; location and capacity

## 0 引言

在节能环保和低碳经济的主旋律下, 分布式光

伏电源以其安装简单、占地面积小等优点, 促进了整个光伏产业的发展<sup>[1]</sup>。配电网中接入分布式光伏是为了最大程度地利用太阳能, 以发挥最大的投资效益, 最好是接入大容量的分布式光伏电源。但是如果接入容量过大, 则可能将生成的功率倒灌

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(5187665744)

回上层电网, 影响系统稳定运行<sup>[2]</sup>。因此, 研究如何优化配电网中分布式光伏的选址定容方法具有重要意义。

近年来, 国内外学者对配电网中分布式光伏选址定容优化方法进行了研究, 并取得了一定的研究成果。文献[3]提出了一种受静态安全性和稳定性指标约束的光伏接入容量模型, 通过改进的遗传算法求解该模型。文献[4]提出一种光伏并网规划模型, 以配电网输出功率最小为优化目标, 以节点电压和潮流为主要约束条件, 采用改进的退火算法求解该模型。文献[5]提出一种光伏电站选址定容优化方法, 以配电网输出功率最小为优化目标, 以支路潮流不倒送和节点电压不越限为约束, 采用生物地理学优化算法对该模型进行求解。文献[6]提出了一种光伏并网选址定容优化模型, 以最小化网损、最少的投资成本、最优的电压质量建立多目标模型。使用改进的遗传算法求解模型, 并通过实例对该方法的有效性进行验证。光伏选址定容优化目标较为广泛, 且优化算法种类较多, 为光伏并网的选址定容优化方法提供了理论基础。

在此基础上, 建立了以投资成本最低、网损最小、电压质量最优为优化目标的选址定容模型, 结合遗传算法、混沌序列和花授粉算法(Flower Pollination Algorithm, FPA)求解优化模型。通过仿真对该方法的可行性进行验证。

## 1 优化模型

### 1.1 目标函数

大规模分布式光伏接入配电网后, 传统的单电源配电网向多电源配电网转换, 光伏合理规划促进了配电网的完善, 大规模分布式光伏并网后, 配电网转变为多电源配电网。合理规划有效提高配电网容量, 反之, 会产生诸多不利影响<sup>[7]</sup>。文中优化模型以投资成本最低、网损最小、电压质量最优为目标。

#### (1) 投资成本最低

分布式光伏接入配电网的成本由两方面组成。安装成本和运维成本。投资成本最低的优化目标如式(1)所示<sup>[8]</sup>。

$$C = \min \left\{ \sum_{k=1}^{N_k} \left[ \frac{r + (1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \times c_1 + c_2 \right] \cdot P_k \right\} \quad (1)$$

式中:  $r$  为固定年利率;  $m$  为光伏寿命;  $c_1$  和  $c_2$  分别为动态和静态投资;  $P_k$  为候选站点的安装容量;  $N_k$  为已安装的光伏数量。

#### (2) 网损最小

将分布式光伏电池连接到配电网后, 如果光伏装置的位置和容量相对合理, 则有功损耗将得到适当改善, 配电网的经济运行能力也得到改善。如果配置不合理, 则网损增加, 网损最小化的优化目标如式(2)所示<sup>[9]</sup>。

$$L = \min \left( \sum_{j=1}^{N_{\text{branch}}} I_j^2 R_j \right) \quad (2)$$

式中:  $L$  为系统网络损耗函数;  $N_{\text{branch}}$  为系统支路数;  $I_j$  和  $R_j$  分别为支路  $j$  的电流值和电阻值。

#### (3) 电压质量最优

光伏并网不合理导致节点电压超过额定值的问题。文中采用电压偏差来评估电压质量, 如式(3)所示<sup>[10]</sup>。

$$Q = \min \left( \sum_{n=1}^{N_{\text{node}}} \left| 1 - \frac{U_{n1}}{U_n} \right| \right) \quad (3)$$

式中:  $Q$ 、 $N_{\text{node}}$  分别为电压偏差函数和节点数;  $U_{n1}$  和  $U_n$  分别为节点的实际电压和额定电压。

#### (4) 多目标优化函数

采用权重系数法结合三个目标(投资成本、网损、电压质量)将多目标优化转化为单目标优化问题进行求解, 如式(4)所示。

$$f = \min \left( a \times w_1 \times \frac{L}{L_0} + b \times w_2 \times \frac{Q}{N_{\text{node}}} + c \times w_3 \times \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \right) \quad (4)$$

式中:  $L$  和  $L_0$  分别为并网系统网损和原始线路网损;  $C$  为总成本;  $C_{\min}$  和  $C_{\max}$  分别为接入容量的最小和最大成本;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为惩罚因子;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  为每个指标的权重因子,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

### 1.2 约束条件

约束由节点电压、功率平衡、容量、电流、渗透率等组成, 并由以下公式表示。

#### (1) 节点电压约束<sup>[11]</sup>如式(5)所示。

$$U_{\min} \leq U_{n1} \leq U_{\max} \quad (5)$$

式中,  $U_{\min}$  和  $U_{\max}$  分别为最小和最大允许电压。

#### (2) 功率平衡约束<sup>[12]</sup>如式(6)和式(7)所示。

$$P_s + \sum_{i=1}^{N_i} P_{PVi} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \quad (6)$$

$$Q_s + \sum_{i=1}^{N_i} Q_{PVi} = Q_{\text{load}} + Q_{\text{loss}} \quad (7)$$

式中:  $P_{PVi}$  和  $Q_{PVi}$  分别为光伏注入的有功功率和无功功率;  $P_s$  和  $Q_s$  分别为配电网首段注入的有功和无功;  $P_{\text{load}}$  和  $P_{\text{loss}}$  分别为系统的总有功功率和网损;

$Q_{load}$  和  $Q_{loss}$  分别为系统的总无功功率和网损。

(3) 容量约束<sup>[13]</sup>如式(8)所示。

$$P_i \leq P_{i,max} \quad (8)$$

式中,  $P_{i,max}$  为光伏接入支路  $i$  允许的最大容量。

(4) 支路的电流约束<sup>[14]</sup>如式(9)所示。

$$I_i \leq I_{i,max} \quad (9)$$

式中,  $I_{i,max}$  为光伏接入支路  $i$  允许的最大电流。

(5) 渗透率约束如式(10)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_i \leq \eta P_{load} \quad (10)$$

式中,  $\eta$  为总容量与总负载的比值。

## 2 优化模型求解

文中采用改进的 FPA 算法求解光伏并网优化模型。

### 2.1 FPA 算法

Yang 在 2012 年提出了花授粉优化算法<sup>[15]</sup>。一株植物仅产生一朵花和一朵花粉配子, 该算法的授粉过程采用了概率  $p$  控制, 如式(11)所示<sup>[16]</sup>。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^t) \quad (11)$$

式中:  $x_i^t$  表示花粉  $i$  进行了  $t$  次迭代;  $g_*$  为全局最优位置;  $\gamma$  为比例因子;  $L(\lambda)$  为主步长, 如式(12)所示<sup>[17]</sup>。

$$L(\lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi \lambda / 2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (0 < s_0 \leq s) \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为步长参数, 其值为 1.5;  $\Gamma(\lambda)$  为标准伽马函数。

非生物的自体授粉是局部的授粉过程, 也是局部的探索过程。位置更新如(13)所示<sup>[18]</sup>。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (13)$$

式中:  $x_j^t$ 、 $x_k^t$  分别为花粉  $j$  和花粉  $k$  的第  $t$  次迭代;  $\varepsilon$  为 [0, 1] 间均匀分布的随机数。

### 2.2 改进 FPA

(1) 混沌序列的初始化

传统的 FPA 算法大多随机对花粉或配子进行初始化, 无法保证花粉位置的遍历性。混沌序列具有高度随机和遍历性<sup>[19]</sup>。

利用混沌序列对花粉位置进行初始化, 保证种群多样性。因为三次映射生成的混沌序列更加均匀, 因此文中选择了三次方映射, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} y(n+1) = 4y(n)^3 - 3y(n) \\ -1 \leq y(n) \leq 1, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (14)$$

$$x_{rd} = \min_d + (1 + y_r(d)) \frac{(\max_d - \min_d)}{2} \quad (15)$$

$$r = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, D$$

式中:  $x_{rd}$  为第  $r$  个粒子在第  $d$  维的坐标;  $\max_d$  和  $\min_d$  为  $d$  维搜索空间的上下限;  $y_r(d)$  为式(14)中生成的第  $r$  个粒子的  $d$  维。

(2) 遗传算法改进的花授粉算法

FPA 算法主要依靠式(11)或式(13)来进行位置更新。多样性随着迭代增加不断降低, 易陷入局部最优<sup>[20]</sup>。通过遗传算法对花授粉算法进行改进, 当最优解在连续迭代(3 次)中改变很少(0.000 1)或不变。

将得到的最优解作为遗传初始参数进行选择、交叉、变异来更新种群。保持种群的多样性, 提高算法的寻优能力<sup>[21]</sup>。

### 2.3 模型求解

模型求解步骤如下:

步骤一 初始化。花粉种群  $n = 25$ 、最大迭代次数  $N_{iter} = 500$ 、转换概率  $p = 0.8$ 、遗传算法的种群大小  $sizepop = 25$ 、迭代次数  $Maxgen = 30$ 、交叉和变异概率分别为  $P_{cross} = 0.6$  和  $P_{mutation} = 0.01$ 。

步骤二 形成初始种群。每朵花代表一个方案, 方案数为  $n$ 、并网点数为  $d$ 。通过式(14)和式(15)对花粉位置进行初始化。计算各花粉的目标函数值, 通过比较得到最优位置<sup>[22]</sup>。

步骤三 迭代。生成随机数  $rand > p$ , 采用式(11)更新全局位置。否则, 采用式(13)进行。

步骤四 最优值更新。找到最优目标函数值, 否则, 继续执行<sup>[23]</sup>。

步骤五 判断局部最优, 如果是, 执行下一步。否则, 跳转到步骤七。

步骤六 进行遗传操作, 找到一组最优解。

步骤七 确定是否达到结束要求。达到, 输出最优解, 否则, 转到步骤三。算法流程如图 1 所示。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 仿真参数

为了验证文中优化方法的有效性, 以 IEEE33 节点为例来验证分布式光伏接入配电网的位置和容量的最优配置<sup>[24]</sup>。配电系统如图 2 所示。系统共有 33 个节点, 容量为 2.063 MVA, 电压为 69 kV, 网络总负荷为 1.770 MW+1.052 Mvar。表 1 给出了系统中分支和节点的对应关系。节点电压上下限为 1.05 p.u. 和 0.95 p.u., 分布式光伏的渗透率小于 50%。文中通过多目标优化并网位置和容量。

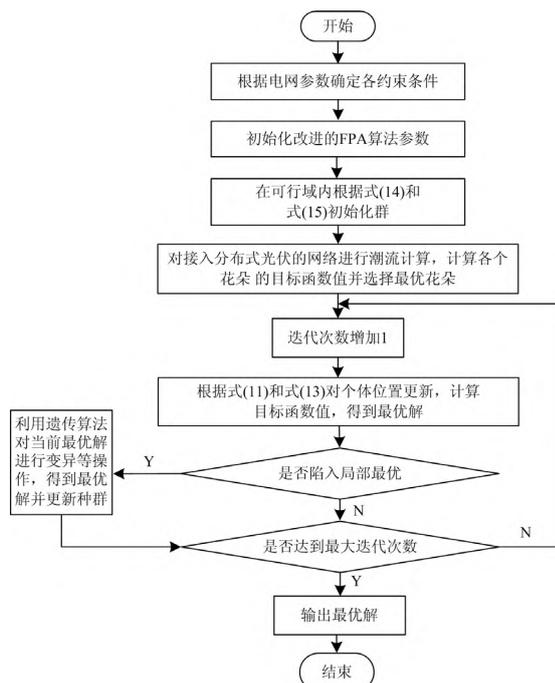


图 1 算法求解流程

Fig. 1 Algorithm solving process

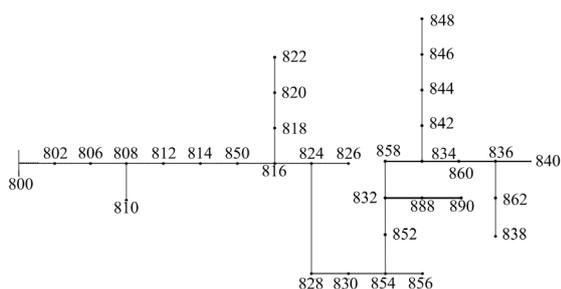


图 2 IEEE33 节点系统

Fig. 2 IEEE33 node system

表 1 配电网支路情况

Table 1 Distribution network branch

支路	起始/终止节点	支路	起始/终止节点
L1	800/802	L17	854/852
L2	802/806	L18	854/856
L3	806/808	L19	852/832
L4	808/810	L20	832/858
L5	808/811	L21	832/888
L6	812/814	L22	888/890
L7	814/850	L23	858/834
L8	850/816	L24	834/842
L9	816/818	L25	834/860
L10	816/818	L26	842/844
L11	816/820	L27	844/846
L12	820/822	L28	846/848
L13	824/822	L29	860/836
L14	824/828	L30	836/862
L15	828/830	L31	836/840
L16	830/854	L32	862/838

### 3.2 算法性能对比

对算法的性能进行验证, 采用 IEEE 33 节点计算算例来比较算法改进前后的收敛性能<sup>[25]</sup>。对比结果如图 3 所示。改进前算法在 300 次迭代后开始收敛, 改进后算法在 40 次迭代后开始收敛。算法经过改进后在收敛性和速度上都有一定的提升。

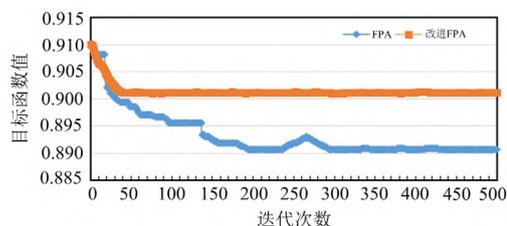


图 3 算法的收敛性对比

Fig. 3 Comparison of convergence of algorithms

### 3.3 算例分析

考虑光伏并网, 文中设定了五种情况。

方案 1 以投资成本最低为优化目标;

方案 2 以网损最低为优化目标<sup>[26]</sup>;

方案 3 以电压质量最优为优化目标;

方案 4 以上三个目标的多目标优化;

方案 5 无分布式光伏接入<sup>[27]</sup>。

选取方案 4 来优化分布式光伏电源并网的位置和容量。通过改进 FPA 算法获得的优化结果是安装地点为 832 节点, 容量为 617.4 kW。图 4 和图 5 所示为光伏并网前后的电压对比和损耗对比。

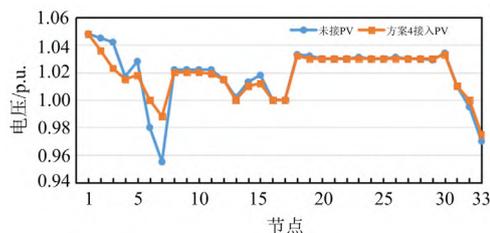


图 4 光伏并网前后电压对比

Fig. 4 Comparison of voltage before and after PV connected to the grid

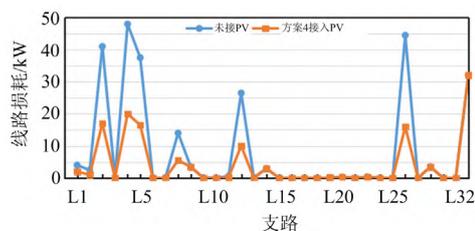


图 5 光伏并网前后线损对比

Fig. 5 Comparison of line loss before and after PV connected to the grid

如图 4 所示, 根据方案 4, 光伏并网后系统电压值上升了 0.011 4 p.u.。电压效应差的节点提升量大, 这表明光伏并网后能对配电系统电压起到支撑作用。

从图 5 可以看出, 经过优化的光伏并网连接后, 支路损耗得到了很好的改善, 尤其是第一段损耗较大的线路得到了明显改善, 表明分布式光伏的合理并网可以降低网损。

为了验证模型的实用性, 对方案 1 到方案 5 进行了比较。各方案的优化结果如表 2 所示。在不同的优化方案中, 侧重点不同, 优化结果也不同。方案 1 成本最低, 但是配电系统的网损很高。方案 2 的网损低, 但投资成本高。方案 3 电压质量最优, 系统最稳定, 但同时投资成本和网络损耗也相对较高。方案 4 的多目标优化结果在各单目标中并不是最优的, 但在三个目标中起到了很好的平衡作用, 体现了多目标优化的优越性。

表 2 方案优化结果

Table 2 Schemes' optimization results

方案	优化目标	安装位置	容量/kW	网损/kW	电压质量	成本/万元
1	C	848	308.8	206.1	0.043 9	599.4
2	L	860	559.3	186	0.041 7	1085.6
3	Q	832	661.0	191.3	0.040 6	1 283
4	f	832	617.4	187.2	0.042 0	1198.3
5	不接 PV	—	—	272.7	0.031 4	—

## 4 结语

本文建立了以投资成本最低、电压质量最优、网损最小为优化目标的选址定容模型。结合遗传算法、混沌序列和花授粉算法求解优化模型。通过仿真验证该方法的可行性。结果表明, 利用文中方法优化的配电网结构可以有效地支撑配电网电压, 有效改善网损。根据现有实验设备和数据规模, 分布式光伏接入配电网的选址和容量优化研究仍处于起步阶段。基于此, 持续改进和完善将是以后工作的重点。

## 参考文献

[1] 杨丽君, 高鹏, 王伟浩, 等. 考虑时间尺度的配电网故障恢复方法研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 453-459.  
 YANG Lijun, GAO Peng, WANG Weihao, et al. Research on distribution network fault recovery method considering time scale[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 453-459.  
 [2] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.

TANG Quan, XU Weiting, YE Xi, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system in distribution network with the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.  
 [3] 叶斌, 朱泽安, 马静, 等. 基于灵活网架的分布式光伏电源准入容量研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 1-7.  
 YE Bin, ZHU Ze'an, MA Jing, et al. Study on access capacity of distributed photovoltaic power supply based on flexible grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 1-7.  
 [4] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 56-60.  
 ZHOU Liangxue, ZHANG Di, LI Canbing, et al. Access capacity analysis considering the correlation between distributed photovoltaic power supply and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 56-60.  
 [5] 章力, 高元海, 熊宁, 等. 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 43-48.  
 ZHANG Li, GAO Yuanhai, XIONG Ning, et al. Site selection and capacity determination planning of distributed photovoltaic power stations considering power flow backward constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 43-48.  
 [6] 张铁峰, 高智慧, 左丽莉, 等. 分布式光伏接入配电网的选址定容优化研究[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(1): 60-66.  
 ZHANG Tiefeng, GAO Zhihui, ZUO Lili, et al. Research on location and capacity optimization of distributed photovoltaic access distribution network[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(1): 60-66.  
 [7] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 41-47.  
 XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation under single phase to ground fault of cable distribution network with different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 41-47.  
 [8] 孔祥玉, 尧静涛, 崔凯, 等. 考虑分布式电源接入的区域配电网规划投资决策方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 41-48.  
 KONG Xiangyu, YAO Jingtao, CUI Kai, et al. Investment decision method for regional distribution network planning considering distributed generation access[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 41-48.  
 [9] 孙浩, 陈永华. 综合能源系统多能流联合仿真技术研究[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 66-72.  
 SUN Hao, CHEN Yonghua. Research on multi energy flow joint simulation technology of integrated energy system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 66-72.  
 [10] 贺志华, 程若发, 杨宏超. 基于多智能体遗传算法的微电网优化策略研究[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(2):

- 126-128.  
HE Shihua, CHENG Ruofa, YANG Hongchao. Research on optimization strategy of microgrid based on multi-agent genetic algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(2): 126-128.
- [11] LIU G, OUYANG M, LU L, et al. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2014, 116(2): 1001-1010.
- [12] ULRIKE K, FRIDOLIN R, ERANDA H, et al. Review—dynamic models of li-ion batteries for diagnosis and operation: a review and perspective[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(16): 3656-3673.
- [13] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [14] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [15] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [16] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. The optimization of a hybrid energy storage system at subzero temperatures: energy management strategy design and battery heating requirement analysis[J]. Applied Energy, 2015, 159: 576-588.
- [17] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [18] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [19] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators[J]. PLOS ONE, 2017, 12(3): 1523-1538.
- [20] FAN Chengli. Hybrid artificial bee colony algorithm with variable neighborhood search and memory mechanism[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 405-414.
- [21] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.  
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [22] 景皓, 李璠, 卢志刚, 等. 基于主从博弈理论的含分布式发电的主动配电网故障恢复方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 77-84.
- JING Hao, LI Fan, LU Zhigang, et al. Active distribution network fault recovery method with distributed generation based on master-slave game theory[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 77-84.
- [23] 顾洁, 王承民, 冯小珊. 含分布式电源的配电网中混合储能优化配置[J]. 浙江电力, 2020, 39(2): 71-76.  
GU Jie, WANG Chengmin, FENG Xiaoshan. Optimal configuration of hybrid energy storage in distribution network with distributed generation[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(2): 71-76.
- [24] 刘坤, 赵丽萍, 李建萍, 等. 考虑开关状态集调整的含光伏并网配电网动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 24-31.  
LIU Shen, ZHAO Liping, LI Jianping, et al. Considering the adjustment of switch state set dynamic fault recovery method for photovoltaic grid connected distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 24-31.
- [25] 刘家权, 刘坤, 周金涛, 等. 基于鲁棒优化的电-气互联型主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 66-74.  
LIU Jiaquan, LIU Shen, ZHOU Jintao, et al. Fault recovery method of electric gas interconnection active distribution network based on robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 66-74.
- [26] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.  
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [27] 李奕璋, 陈红坤, 石晶, 等. 基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 111-119.  
LI Yizhang, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. Fast short circuit fault detection method based on the square sum ratio of three-phase current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 111-119.

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-30

作者简介:

陈德炜(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: cdwwh08@163.com

徐威(1994—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

肖云佳(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 张爱琴)