

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0972.2018.03.026

# 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构

张涛<sup>1a\*</sup>, 张东方<sup>1a</sup>, 王凌云<sup>1b</sup>, 徐雪琴<sup>2</sup>, 周远化<sup>1a</sup>, 张晓林<sup>1a</sup>

(1. 三峡大学 a. 电气与新能源学院; b. 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;  
2. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 分布式电源(DG)的接入为主动配电网(ADN)的稳定运行带来了挑战,而重构是提高系统稳定性的重要手段。提出了一种改进小生境多目标粒子群算法(INMPSO),建立了考虑网损、电压质量指数(VQI)、开关操作次数的多目标优化函数,对主动配电网的静态重构模型进行求解。全局最优粒子位置通过小生境共享机制来更新,使种群具有多样性和全局平均分布。根据模糊满意度评价决策方法从得到的 Pareto 解集中选择出最优折衷解,为决策者提供了科学的决策依据。最后以 IEEE33 节点标准配电系统为例,并与基本多目标粒子群算法(MPSO)的优化结果进行对比,验证所提模型和方法的有效性。

**关键词:** 小生境技术; 多目标优化; 主动配电网重构; 分布式电源; Pareto 解集

**中图分类号:** TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0972(2018)03-0473-06

## Optimal Reconfiguration of the Active Distribution Network Based on Improved Niche Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHANG Tao<sup>1a\*</sup>, ZHANG Dongfang<sup>1a</sup>, WANG Lingyun<sup>1b</sup>, XU Xueqin<sup>2</sup>, ZHOU Yuanhua<sup>1a</sup>, ZHANG Xiaolin<sup>1a</sup>

(1a. College of Electrical Engineering and New Energy; b. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. Changjiang Three Gorges Navigation Administration, Yichang 443002, China)

**Abstract:** It is a challenge to the stable operation of the Active Distribution Network with the distributed generations (DG), and the reconfiguration is an important method to improve the stability of the system. The Improved Niche Multi-objective Particle Swarm Optimization (INMPSO) was proposed to solve the model of active distribution network reconfiguration with DG; the network loss, voltage quality index and the number of switching operation were set up as the multi-objective optimization functions. Through the niche sharing mechanism which maintains the diversity and distribution uniformity of the population to update the global optimal position, the optimal compromise solution was chosen from the Pareto solutions using the fuzzy satisfaction evaluation decision method, which provides a scientific basis for the decision maker. Finally, the optimization results of IEEE33 node distribution system based on MPSO were compared to verify the effectiveness of the proposed model and method.

**Key words:** niche technology; multi-objective optimization; active distribution network reconfiguration; distributed generator; Pareto solution set

## 0 引言

随着传统能源的短缺、电力需求的持续增长正驱动电网朝着灵活、智能和可持续方式发展,传统配电网难以达到适应现代配电系统的运行要求,为此,主动配电网的概念应运而生<sup>[1]</sup>。而主动配电网

的特点就是 DG 的接入, DG 在配电网中的运用可以降低对化石能源的依赖,对环境保护起到关键性的作用<sup>[2]</sup>。

配电网重构本质上是一个复杂的非线性优化问题,在数学领域称为 NP 难类组合优化问题<sup>[3]</sup>,目的是通过切换开关状态达到降低损耗、提高电压质量

收稿日期: 2017-06-07; 修订日期: 2017-11-29; \* 通信联系人, E-mail: unifzhang@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407104)

作者简介: 张涛(1981—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 博士, 主要从事电力系统优化运行等方向研究。

等,实现配电系统的稳定运行.传统配电网中正逐步向一个含有复杂多电源网络的结构发展<sup>[4]</sup>.分布式电源接入主动配电网是智能配电网发展不可缺少的一个重要环节,对于传统(被动)配电网,已经有较多的研究了,而配电网的模式由被动过渡到主动会是今后发展的重要方向,所以对主动配电网的研究将会更加受到学者的青睐.有较多文献重构时考虑了多个优化指标,采用加权法将多目标优化转化成单目标优化问题后再进行分析<sup>[5]</sup>,但是,各目标之间相互制约的因素和决策变量有关,主观性因素对不同目标函数权重值的分配具有较大影响<sup>[6]</sup>,而Pareto多目标优化技术可以有效避免权重值的运用,对不同指标进行规范化求解.小生境共享技术发展的同时已经有所运用,文献[6,7]通过小生境遗传算法进行配电网重构研究,文献[8]通过小生境粒子群算法进行输电网检修计划的研究,但鲜有文献通过小生境粒子群算法进行主动配电网的优化重构研究.

综上所述,本文构造了同时考虑有功损耗、电压质量指数(VQI)和开关次数的多目标主动配电网静态重构模型;在主动配电网中接入DG,通过重构优化,可以使配电网运行更加稳定.提出了一种改进的小生境多目标粒子群算法(INMPSO),采用小生境共享技术,克服了基本粒子群算法的早熟和易陷入局部收敛的现象;在Pareto排序的MPSO算法基础上采取动态参数调整策略进行算法改进,提高了算法寻优的稳定性,根据决策者偏好信息,从Pareto优化解集中选出相应重构方案的模糊满意度评价决策法,使算法能够更好地适合工程运用.最后,采用IEEE33节点算例进行仿真运算,和基本多目标粒子群算法对比,结果证明了所提方法的优越性和有效性.

## 1 重构模型的建立

从改善系统经济效益、提高供电安全性以及开关使用年限考虑,建立有功损耗、电压质量指数、开关次数3个目标组合作为网络的静态重构目标,同时,在系统中引入DG,使模型更有实际意义.

### 1.1 目标函数

#### 1.1.1 有功损耗

考虑系统经济性,建立网损最小的目标函数.

$$P_{\text{loss}} = \min \sum_{i=1}^N r_i k_i |I_i|^2, i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

式(1)中: $N$ 是配电网中支路总数; $r_i$ 是支路 $i$ 的电

阻; $I_i$ 是流过支路 $i$ 的电流; $k_i$ 为开关 $i$ 的状态,0、1分别表示断开、闭合状态; $N$ 为馈线中节点编号.

#### 1.1.2 电压质量指数

系统稳定性以及电能质量均和节点电压有关.而VQI能够显示出主动配电网是否处于稳定运行的状态,因此选取 $N$ 条馈线的节点VQI平均值作为目标函数<sup>[9]</sup>,表达式如下:

$$VQI_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VQI_i, \quad (2)$$

其中 $VQI_i$ 可用式(3)表达.

$$VQI_i = \frac{(V_i - V_{\min}) \cdot (V_{\max} - V_i)}{(V_{\text{nom}} - V_{\min}) \cdot (V_{\max} - V_{\text{nom}})}. \quad (3)$$

式(3)中: $V_i$ 是节点 $i$ 电压; $V_{\text{nom}}$ 是额定电压; $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 分别表示电压最大值、最小值.

#### 1.1.3 开关次数

配电网重构实质上就是由开关的开断状态组成,从开关的使用年限考虑,应该尽量减少开关操作次数<sup>[7]</sup>.其目标函数可用式(4)表示.

$$F_k = \sum_{i=1}^m (1 - y_i) + \sum_{j=1}^n z_j. \quad (4)$$

式(4)中: $y_i$ 表示分段开关; $z_j$ 表示联络开关; $m$ 为配电网中的分段开关的数量; $n$ 为配电网中联络开关的数量.

## 1.2 分布式电源的潮流计算模型

对于配网中接入的分布式电源可用3类节点表示: $P$ 、 $Q$ 型, $P$ 、 $I$ 型以及 $P$ 、 $V$ 型;在配网前推回代潮流计算中,对 $P$ 、 $I$ 型以及 $P$ 、 $V$ 型DG节点需要通过无功修正以满足负荷为PQ节点的要求,为此本文将并入的DG看成PQ节点,简化成“负的负荷”进行计算<sup>[4,11]</sup>.

$$\begin{cases} P' = -P_{\text{DG}}, \\ Q' = -Q_{\text{DG}}. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $P_{\text{DG}}$ 、 $Q_{\text{DG}}$ 分别是DG的有功功率和无功功率.

### 1.3 约束条件

(1) 配网潮流约束.

(2) 节点电压约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad (6)$$

式(6)中: $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ 分别为节点 $i$ 电压幅值的下限和上限.

(3) 支路电流约束:

$$I_l \leq I_l^{\max}, \quad (7)$$

式(7)中: $I_l^{\max}$ 为支路 $l$ 载流量上限值.

(4) 网络拓扑约束:

$$g_k \in G_k, \quad (8)$$

式(8)中: $g_k$ 为开关状态组合; $G_k$ 为构成放射形网络的开关位置组合的集合。

(5) 开关操作次数限制:

$$0 < O_{PT} \leq O_{PTmax}, \quad (9)$$

式(9)中: $O_{PT}$ 为总的开关操作次数; $O_{PTmax}$ 为开关的最大操作次数。

## 2 面向主动配电网重构的 INMPSO 算法

### 2.1 二进制粒子群优化算法

二进制粒子群算法将位置更新公式的每维分量定义为0或1,用于主动配电网重构可表示开关的状态。本文采用Sigmoid函数进行位置更新,算法速度、位置更新公式如下:

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^k + c_1r_1(p_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2r_2(g_{i,j}^k - x_{i,j}^k), \quad (10)$$

$$\begin{cases} S(x_{i,j}^{k+1}) = 1/(1 + \exp(-v_{i,j}^{k+1})), \\ x_{i,j}^{k+1} = 1; \quad \text{rand} < S(x_{i,j}^{k+1}) \\ x_{i,j}^{k+1} = 0; \quad \text{rand} > S(x_{i,j}^{k+1}), \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $k$ 为迭代次数; $v_{i,j}^k$ 是在粒子 $I$ 的当前速度; $w$ 为惯性权重; $c_1$ 、 $c_2$ 是学习因子,通常取值为2; $r_1$ 、 $r_2$ 是 $[0,1]$ 之间的随机数; $x_{i,j}^{k+1}$ 是粒子 $I$ 在迭代过程后的此代位置; $p_{i,j}^k$ 是粒子 $I$ 的个体极值点位置; $g_{i,j}^k$ 是种群在当前迭代后的全局最优点位置; $\text{rand}$ 为随机产生一个介于 $[0,1]$ 之间的正实数的函数; $S(x)$ 为Sigmoid函数值。

### 2.2 小生境适应度共享技术

适应度共享技术在选择全局最优粒子时保持了种群在迭代过程中的多样性<sup>[9,13]</sup>。小生境中个体之间共享度值记为 $S_i$ 。

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_b} f_{sh}(d_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, N_b, \quad (12)$$

式(12)中: $N_b$ 为小生境内个体数量; $f_{sh}(d_{ij})$ 为共享函数,可由式(13)表示。

$$f_{sh}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - (d_{ij}/\sigma_{share})\alpha, & 0 < d_{ij} < \sigma_{share}, \\ 0, & d_{ij} \geq \sigma_{share}, \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: $d_{ij}$ 表示小生境粒子间的欧式距离,即

$$d_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_b} (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (14)$$

$\sigma_{share}$ 为粒子 $i$ 的小生境半径值,根据粒子 $i$ 和 $j$ 之间的当量距离动态更新,表达式为

$$\sigma_{share}^i = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} d_{ij}. \quad (15)$$

按照小生境共享技术的特征,外部解集中个体 $X_i$ 的适应度可用式(16)定义。

$$F_i = 1/S_i, \quad (16)$$

式(16)中: $F_i$ 为个体 $X_i$ 共享后的适应度。

为使保留下来的个体是群体最优,对其中适应度值较差的粒子进行处罚<sup>[13]</sup>。

$$F_i = \text{Penalty}, \quad (17)$$

式(17)中:惩罚项值 $\text{Penalty} = 10^{-6}$ 。

### 2.3 动态参数调节

一般多目标粒子群算法在寻优过程中,对惯性权重的取值、群体全局寻优的指导能力不足<sup>[14]</sup>,而惯性因子 $w$ 可以体现粒子对上一代速度的传承能力;学习因子 $c$ 用于调节粒子的自适应能力。因此,本文算法对上述参数进行动态变化调节。

$$\begin{cases} w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times (\text{gen} - t)/\text{gen}, \\ c_1 = c_{\max} + (c_{\min} - c_{\max}) \times t/\text{gen}, \\ c_2 = c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min}) \times t/\text{gen}, \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为惯性权重的最大值和最小值; $c_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 分别为学习因子的最小值、最大值; $t$ 为当前迭代次数; $\text{gen}$ 为最大迭代次数。

### 2.4 模糊满意度评价决策方法

得到Pareto最优解后,为了从中获得一组同时考虑3个目标的折衷解,本文运用模糊隶属度来分别表示各个Pareto解对应的目标满意度,根据满意度值,确定选择最终的一组解。定义模糊隶属度函数如下。

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i\min}, \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}}, & f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max}, \\ 0, & f_{i\max} < f_i, \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: $f_i$ 为第 $i$ 个目标函数的适应度值; $f_{i\max}$ 、 $f_{i\min}$ 分别为对应目标函数的上、下限。

根据式(20)求各个解的满意度水平,折衷解即为满意度最好的解。

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mu_i, \quad (20)$$

式(20)中: $M$ 为目标函数个数; $\mu$ 值越大,满意度越好。

### 2.5 算法流程

根据对目标函数的计算可以得到开关组合的

最优折衷解,即最优重构方案,其中本文所运用的 INMPSO 算法流程如图 1 所示。

### 3 算例分析

采用 IEEE33 节点标准配电系统<sup>[15]</sup> 进行仿真分析,并通过与 MPSO 算法相比较,证明所提算法效果更好,得出的结果更优.假设系统中 DG 的接入位置如表 1 所示<sup>[10]</sup>.

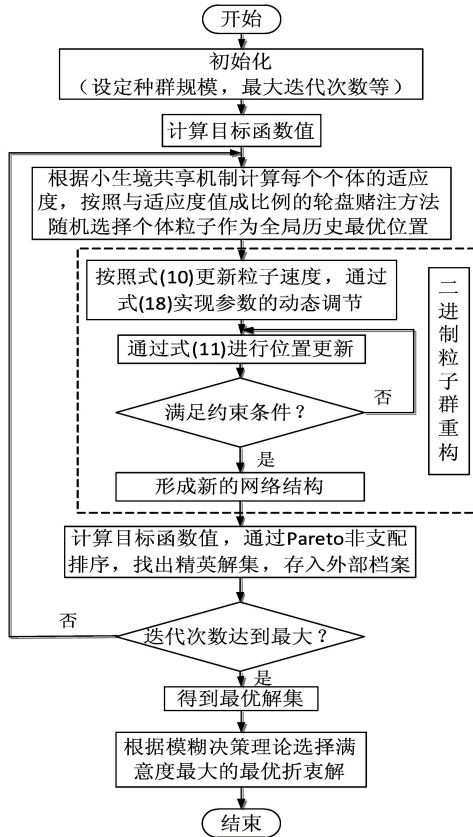


图 1 INMPSO 算法流程图

Fig. 1 The algorithm flow chart of INMPSO

表 1 DG 接入节点及参数

Tab. 1 The access nodes and parameters of DG

DG	有功功率/kW	功率因数	接入点
DG1	1000	1	22
DG2	1000	0.95	18

IEEE33 节点测试系统中有 33 个节点、37 条线路、5 条联络开关,该配电系统总负荷为 3715.00 kW + j2300.00 kvar,详细数据可参看文献[15].接入 DG 后系统图如图 2 所示。

#### 3.1 单目标优化分析

提取 VQI 这一个目标进行二进制粒子群算法

的分析,对比没有接入 DG 时重构前后系统电压指标结果.设置种群规模为 30,迭代次数为 100 次,其中 VQI 值越接近 1 说明系统越稳定,得到最优结果重构后断开的支路为 7、9、14、28、36,迭代曲线如图 3。

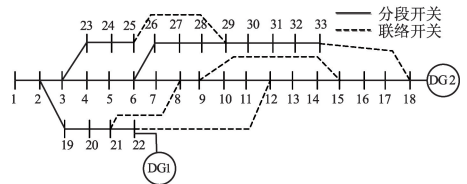


图 2 含 DG 的 IEEE33 节点配电系统图

Fig. 2 The distribution system diagram of IEEE33 with DG

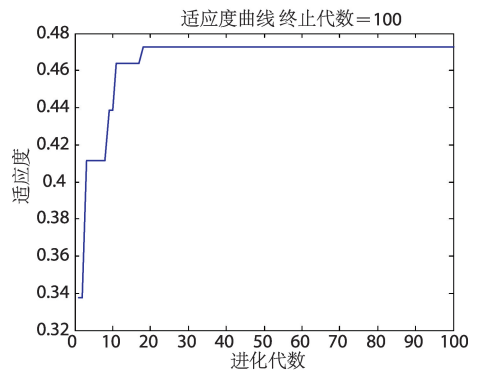


图 3 VQI 适应度曲线

Fig. 3 The average fitness curve of VQI

由图 3 可见,VQI 平均值由未重构前的 - 0.4199 提高到 0.4728,网损由 202.6762 kW 降低到 141.9163 kW,降幅达 30%,电压最小值由 0.9131 p.u 提高到 0.9378 p.u..重构前后 VQI 变化如图 4 所示。

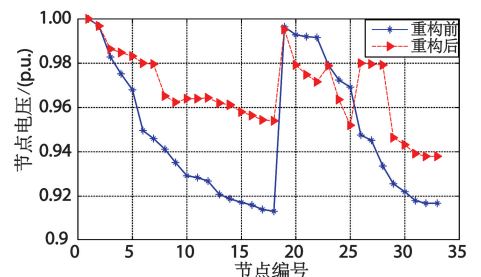


图 4 未接入 DG 重构前后的电压值

Fig. 4 The voltage values before and after reconfiguration without DG

由图 4 可见,电压值较重构前有所提高,说明文中所用的二进制粒子群算法适合运用到主动配电网的优化重构当中。

### 3.2 多目标优化分析

表 2 给出了未进行多目标重构操作时求解得到的各目标函数值。

使用本文所提出的 INMPSO 算法进行主动配电网的多目标重构求解,设置种群规模为 30,迭代次数 50 次,并与 MPSO 算法相比较,得到最优解集分布如图 5。

表 2 IEEE33 节点配电系统未重构时各目标函数值  
Tab. 2 The objective function value of the IEEE33 system without reconfiguration

有无 DG	断开支路	网损/kW	VQI	开关次数
未接入	33   34   35   36   37	202.6762	- 0.4199	0
接入	33   34   35   36   37	139.3443	0.5562	0

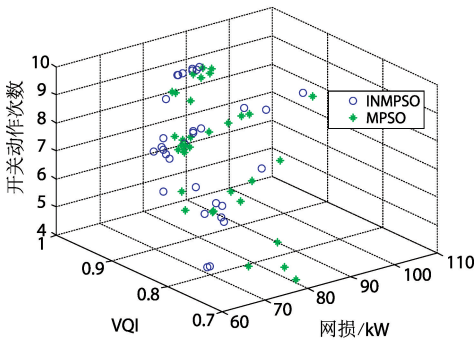


图 5 INMPSO 算法和 MPSO 算法求解得到的 Pareto 最优解集对比图

Fig. 5 The comparison of Pareto optimal solutions between INMPSO and MPSO

通过改进小生境多目标粒子群算法求解得到的结果,采用模糊决策理论进行选择时得到的最优折衷解如表 3 所示。

表 3 两种优化算法的模糊满意度最优的解比较

Tab. 3 The optimal solution of the fuzzy satisfaction degree of two optimization algorithms

优化算法	断开支路	网损/kW	VQI	开关次数
INMPSO	7   15   33   34   37	71.9050	0.8204	4
MPSO	6   13   34   35   37	81.0028	0.7302	4

采用前推回推法与本文算法相结合计算得到含 DG 的优化解集。由表 3—表 5 可知,两种算法均能降低系统网损和提高电压质量,但是采用本文所提的 INMPSO 算法能够得到比 MPSO 算法更好的解,说明本文所提优化方法的效果更好。当决策者对某一目标函数的要求较高时,可通过本文方法取 Pareto 最优解集中模糊满意度最好的解作为决策

者的优化方案。

通过表 3 可以看出,在 IEEE33 节点中,通过 INMPSO 算法求解得到的模糊满意度最优解中网损和 VQI 值分别为 71.9050 kW 和 0.8204,比 MPSO 算法得到的网损值 81.0028 kW 和 VQI 值 0.7302 更优;通过极值结果比较,INMPSO 算法求解得出的网损和 VQI 极值均比 MPSO 算法求解得到的解更优。综合比较表 3—表 5 的结果,说明文中所提的改进方法是有效的。

表 4 两种优化算法总网损极值比较

Tab. 4 Total active power loss solution of two kinds of optimization algorithms

优化算法	断开支路	网损/kW	VQI	开关次数
INMPSO	6   9   14   15   37	65.2385	0.8651	8
MPSO	6   8   14   15   28	68.8478	0.8259	10

表 5 两种优化算法 VQI 极值比较

Tab. 5 The voltage quality index solution of two kinds of optimization algorithms

优化算法	断开支路	网损/kW	VQI	开关次数
INMPSO	14   21   28   30   33	92.1761	0.9115	8
MPSO	7   10   14   28   30	81.1787	0.9004	10

## 4 结论

本文在考虑 DG 接入的主动配电网基础上,建立了以网损、电压质量指数、开关操作次数为目标函数的多目标主动配电网优化重构模型,并在多目标粒子群算法中引入小生境共享技术,通过算法参数的动态调整以求取最优解的多目标优化方案。主要结论如下:

(1) 相对于传统的多目标粒子群算法,INMPSO 算法在求解优化模型方面,通过小生境共享机制更新全局最优粒子;动态变化的惯性因子和异步变化的学习因子用以提高算法的调节适应能力,能够指导种群全局寻优能力,保持了种群的多样性;

(2) 采用本文提出的 INMPSO 求解后根据模糊满意度评价决策方法得到了网损、电压质量指数、开关操作次数的折衷解,能够为决策者提供一个科学有效的优化重构方案。

文中所提方法是针对静态主动配电网进行的重构研究,此方法是主动配电网动态重构的基础,下一步研究将会考虑 DG 出力以及负荷随时间变化的动态重构研究。

## 参考文献:

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.  
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] 朱正,廖清芬,刘涤尘,等.考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):82-88,96.  
ZHU Zheng, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 82-88, 96.
- [3] 马草原,孙展展,尹志超,等.基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J].电工技术学报,2016,31(11):120-128.  
MA Caoyuan, SUN Zhanzhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 120-128.
- [4] 卢扬,吴俊勇,郝亮亮.基于改进MOBPSO算法的含分布式电源的多目标配电网重构[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):62-68.  
LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 62-68.
- [5] 尹洪,刘天琪,李樊,等.基于免疫遗传算法的含分布式电源配电网重构[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(4):15-19.  
YIN Hong, LIU Tianqi, LI Fan, et al. Distribution network reconfiguration with different distributed generation based on immune genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 15-19.
- [6] 彭锦新,刘天琪,刘辉乐.基于小生境技术的Pareto多目标配网重构[J].继电器,2005,33(8):13-17.  
PENG Jinxin, LIU Tianqi, LIU Huile. Distribution network reconfiguration with pareto multi-objective based on niche[J]. Relay, 2005, 33(8): 13-17.
- [7] 李伟,张振刚,闰宁.基于改进小生境遗传算法的Pareto多目标配电网重构[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):1-5.  
LI Wei, ZHANG Zhengang, RUN Ning. Pareto multi-objective distribution network reconfiguration based on improved niche genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 1-5.
- [8] 刘文颖,谢昶,文晶,等.基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J].中国电机工程学报,2013,33(4):141-148.  
LIU Wenying, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148.
- [9] SU Shengyi, LU Channan, CHANG Rungfang, et al. Distributed generation interconnection planning: A wind power case study[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 181-189.
- [10] 彭显刚,林利祥,刘艺,等.计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置[J].电网技术,2015,39(8):2188-2194.  
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generation considering uncertainties of plug-in electric vehicles and renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2188-2194.
- [11] 张涛,史苏怡,徐雪琴.基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):22-28.  
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [12] 崔挺,孙元章,徐箭,等.基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J].中国电机工程学报,2011,31(19):43-50.  
CUI Ting, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Reactive power optimization of power system based on improved niche genetic algorithm[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(19): 43-50.
- [13] 向长城,黄席樾,杨祖元,等.小生境粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2007,43(15):41-43.  
XIANG Changcheng, HUANG Xiyue, YANG Zuyuan, et al. Niche particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(15): 41-43.
- [14] 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.
- [15] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. Power Engineering Review, IEEE, 1989, 9(4): 101-102.

责任编辑:郭红建