

# 基于 E 占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复

姚玉海<sup>1</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 郭昆亚<sup>2</sup>, 金鹏<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

**摘要:** 针对基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的经典多目标智能算法在迭代过程中没有考虑决策者的偏好知识, 从而影响了算法收敛性的问题, 提出了一种基于 E 占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复。通过采用改进原点距离的 E 占优机制, 可以将决策者的偏好知识有效地融入到故障恢复方案的评价过程中。在算法迭代过程中, 采用轮盘赌策略更新群体极值, 采用方案的综合值对外部档案进行维护, 使得决策者的偏好知识可以有效地指导下一代种群的产生。最后, 通过算例验证了所提算法的可行性和有效性, 并且该方法比基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的多目标智能算法拥有更好的收敛性能, 得到的最优前沿数量更少, 质量更高。

**关键词:** 配电网; 故障恢复; 多目标二进制粒子群算法; E 占优机制

## Distribution network service restoration using a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance

YAO Yu-hai<sup>1</sup>, WANG Zeng-ping<sup>1</sup>, GUO Kun-ya<sup>2</sup>, JIN Peng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China)

**Abstract:** The classic multi-objective evolutionary algorithm based on Pareto dominance criteria and crowding distance sorting method does not consider the preference of decision maker in the iterative process, which leads to the decline of convergence performance. For the problem, this paper proposes a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance to solve distribution network service restoration. By adopting E-dominance strategy of improving the origin distance, it can integrate the preference of decision makers into the evaluation process. This paper adopts roulette strategy to update the global best solution and integrated value to maintenance the external files, which can effectively guide the next generation of particle with preference of decision makers during iterative process. Finally, an example shows that the approach has better convergence performance, less quantity and better quality on solution than the classic multi-objective algorithm based on Pareto dominance criteria and crowding distance.

**Key words:** distribution network; service restoration; multi-objective binary particle swarm optimization; E-dominance

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0076-06

## 0 引言

故障恢复是智能配电网自愈控制的一项重要内容, 对配电网安全、经济、优质运行具有重要意义。

故障恢复属于多目标、多约束、非线性的整数组合优化问题<sup>[1]</sup>, 在综合考虑开关操作次数、馈线裕度、负荷恢复量、网络约束、电压质量等因素下, 确定优选的供电恢复方案。近年来, 国内外学者已

提出了多种方法解决此问题, 如遗传算法<sup>[2-3]</sup>、粒子群算法<sup>[4-5]</sup>、蚁群算法<sup>[6]</sup>等。但这些方法在处理多目标问题上, 采用权系数将多目标优化问题转换为单目标优化问题, 文献[7]论述了这种处理方法的两个局限性, 并在舰船电网背景下应用非支配排序遗传算法对故障恢复问题进行求解, 在得到非支配解集之后, 再应用偏好信息选择符合工程实践的最优解。目前, 多目标进化算法在网络重构和故障恢复上的成果远不及传统进化算法。文献[8-9]根据 Pareto 占优机制对故障恢复的解进行了等级划分, 并采用改进的非支配排序遗传算法 II 对配电网故障恢复问题

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(KJ[2013]896)

进行求解。文献[10]提出了基于改进小生境遗传算法的 Pareto 多目标配电网重构, 通过设置个体之间的距离判别标准为动态函数, 交叉、变异等遗传操作步骤采用改进自适应规则, 使得小生境遗传算法的全局寻优能力和快速收敛能力得到了一定程度的发挥。但是, 上述基于 Pareto 占优机制多目标智能算法存在以下几个问题:

(1) Pareto 占优机制没有综合考虑方案中各个指标值和改进指标个数的影响。

(2) Pareto 占优没有考虑到决策者的偏好, 因此算法的收敛方向无法获得决策者的指导, 使得算法的收敛过程缓慢。

(3) 基于 Pareto 占优机制多目标智能算法在选取精英个体和维护外部档案时采用拥挤距离作为判断标准, 这种方法虽然可以保证种群的多样性, 但过于依赖解的客观情况, 没有考虑故障恢复的偏好知识, 容易导致算法收敛不稳定。

针对上述问题, 本文采用基于 E 占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复问题。E 占优机制易于按照决策者的偏好进行修改, 使得决策者的决策偏好意图能够灵活地加入到优化过程中。在选取精英个体和维护外部档案时考虑了决策者的偏好信息, 使得算法中的种群个体在一定的选择压力下朝着 Pareto 优化前沿收敛。最后, 通过算例验证了本文方法的有效性和快速收敛能力。

## 1 配电网故障恢复的数学模型

本文以失电负荷  $f_1$ 、开关操作次数  $f_2$ 、网损  $f_3$ 、载荷平衡  $f_4$  和电压质量  $f_5$  为目标函数。

$$\min f_1 = \sum_{i \in A} P_i \quad (1)$$

式中:  $A$  为未恢复的节点集合;  $P_i$  为节点  $i$  的负荷。

$$\min f_2 = \sum_{i \in T} |K_i - K_i'| \quad (2)$$

式中:  $T$  为开关集合;  $K_i'$ 、 $K_i$  为恢复前后的开关状态。

$$\min f_3 = \sum_{i \in B} P_{i\text{loss}} \quad (3)$$

式中:  $B$  为支路集合;  $P_{i\text{loss}}$  为支路  $i$  的网损。

$$\min f_4 = \max_{i \in B} \left( \frac{L_i}{LN_i} \right) - \min_{i \in B} \left( \frac{L_i}{LN_i} \right) \quad (4)$$

式中:  $L_i$  为支路  $i$  的负荷;  $LN_i$  为支路  $i$  的额定容量。

$$\max f_5 = \min_{i \in N} (V_i) \quad (5)$$

式中:  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $N$  为网络的节点数。

需要满足的约束条件有:

(1) 配电网的拓扑约束, 故障恢复后的配电网拓扑结构为辐射状的连通网络。

(2) 配电网的节点电压约束。

(3) 配电网的支路电流约束。

## 2 E 占优机制

为了更好地描述多目标粒子群算法, 本文首先对 E 占优机制<sup>[11-12]</sup>进行介绍。设多目标函数为  $F(x) = \{ f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) \}$ ,  $x_1, x_2$  为多目标函数任意的两个解,  $n$  为指标个数。

定义:  $B$ 、 $W$ 、 $E$

$B(x_1, x_2)$  表示在目标函数中  $F(x_1)$  比  $F(x_2)$  表现好的指标个数。

$W(x_1, x_2)$  表示在目标函数中  $F(x_1)$  比  $F(x_2)$  表现差的指标个数。

$E(x_1, x_2)$  表示在目标函数中  $F(x_1)$  和  $F(x_2)$  表现相同的指标个数。

为了表述方便, 用  $B$ 、 $W$ 、 $E$  分别表示  $B(x_1, x_2)$ 、 $W(x_1, x_2)$ 、 $E(x_1, x_2)$ 。并且容易得出  $B$ 、 $W$ 、 $E$  之和为指标个数  $n$ 。

定义: 原点距离  $\|F(x)\|$

$$\|F(x)\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_j(x))^2} \quad (6)$$

由于故障恢复的各个指标量纲不一致, 无法直接求取原点距离, 需要对数据进行标准化处理。

假设有  $m$  个待评价方案, 每个方案有  $n$  个指标, 则构建判断矩阵  $R'$  为

$$R' = [f'_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

式中,  $f'_{ij}$  为第  $i$  个方案的第  $j$  个指标的有名值。

常用的指标有效益型和成本型两类。效益型指标值越大越好, 成本型指标值越小越好。本文涉及的失电负荷、开关次数、网损和载荷平衡均属于成本型指标, 用式(8)处理, 电压质量属于效益型指标, 用式(9)处理。处理后的判断矩阵记为  $R$ 。

$$f_{ij} = \frac{f'_{ij} - \min_j \{f'_{ij}\}}{\max_j \{f'_{ij}\} - \min_j \{f'_{ij}\}} \quad (8)$$

$$f_{ij} = \frac{\max_j \{f'_{ij}\} - f'_{ij}}{\max_j \{f'_{ij}\} - \min_j \{f'_{ij}\}} \quad (9)$$

式中,  $f_{ij}$  表示第  $i$  个方案第  $j$  个评价指标标准化后的值, 并且  $f_{ij} \in [0, 1]$ 。

特别地, 当指标  $j$  在所有方案中取值一样时, 为使  $f_{ij}$  有意义, 规定  $f_{ij}=1$ 。

在实际故障恢复问题中, 需要考虑各个指标的

相对重要程度,评价指标  $j$  相应的权重值为  $\lambda_j$ , 其中  $\lambda_j \in [0,1]$ , 并且满足式(10)。

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (10)$$

虽然故障恢复问题的各个指标值是变化的,但其相对重要程度是固定的。将指标标准化并考虑权重后的原点距离为

$$\|F(x)\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\lambda_j f_j(x))^2} \quad (11)$$

定义: E 占优

$x_1, x_2$  为多目标函数任意的两个解, 如果满足  $B-W > 0$  且  $\|F(x_1)\| < \|F(x_2)\|$ , 那么  $x_1$  E 占优于  $x_2$ 。

### 3 多目标二进制粒子群算法

多目标二进制粒子群算法的主要步骤包括外部档案维护、个体极值更新和群体极值更新<sup>[13-14]</sup>。

#### 3.1 基本二进制粒子群算法

粒子群算法主要针对连续空间函数的优化问题,为了解决实际工程中的组合优化问题, Kennedy 等人提出了离散二进制粒子群算法<sup>[11]</sup>。该算法用二进制编码方式来表示位移,在故障恢复问题中, 0 和 1 分别表示开关的断开与闭合状态。算法通过以速度为变量的 Sigmoid 函数来计算对应位移状态改变的概率,速度大一些则对应位移为 1 的概率大,速度小一些则对应位移为 0 的概率大。粒子的速度通过粒子上一次的速度、个体极值和群体极值来更新,个体极值是每个粒子出现过的最好的位移,群体极值是所有粒子中最好的位移。就这样通过对“个体经验”和“群体经验”的学习,粒子逐步迭代到最好的位移,即目标函数最优的解。

算法的速度和位移更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1^k(p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2^k(p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (12)$$

$$S(v_{id}^k) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^k)} \quad (13)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & rand < S(v_{id}^k) \\ 0, & rand \geq S(v_{id}^k) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $w$  是惯性因子;  $c_1$  和  $c_2$  是学习因子;  $r_1, r_2$  和  $rand$  是  $[0,1]$  上的随机数;  $d=1,2,\dots,D$ ,  $D$  是解的维数;  $i=1,2,\dots,m$ ,  $m$  是种群规模;  $v_{id}^k$  是粒子在第  $k$  次迭代中第  $d$  维的速度;  $x_{id}^k$  是粒子在第  $k$  次迭代中

第  $d$  维的位移;  $p_{id}^k$  是粒子在第  $k$  次迭代中第  $d$  维的个体极值;  $p_{gd}^k$  是粒子在第  $k$  次迭代中第  $d$  维的群体极值;  $S(v_{id}^k)$  是以速度为变量的 Sigmoid 函数值。

#### 3.2 外部档案的维护

E 占优机制与 Pareto 机制相同,在每次迭代过程中均可能出现多个不受支配的解,外部档案则用于存储这些解。外部档案的维护主要是决定新解是否能加入外部档案,及外部档案中的解是否被淘汰。具体维护过程分为四种情况:

- (1) 若外部档案为空集,则新解存入外部档案中;
- (2) 若外部档案中存在某个解 E 占优于新解,那么新解不能存入外部档案中;
- (3) 若外部档案中不存在某个解 E 占优于新解,那么新解存入外部档案中;
- (4) 若新解 E 占优于外部档案的某个解,那么这个解就从外部档案中删除。

此外,由于外部档案的容量大小是有限的,当不受支配的解的个数大于外部档案的容量时,传统方法是根据外部档案中解的拥挤距离进行删除,以保证容量限制。但这种处理方法没有考虑问题的偏好知识,删除的解可能恰是希望得到的解。本文处理方法是将各个解的指标值进行加权平均,求得多目标的综合值,将综合值较差的解删除,直至满足容量限制。综合值的求取方法如式(15)。

$$fit_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j f_{ij}(x) \quad (15)$$

式中,  $fit_i$  为第  $i$  个方案的综合值。

#### 3.3 个体和群体极值的更新

个体和群体极值的更新在粒子群算法中至关重要,直接影响着最终结果的获得。

个体极值的调整主要是根据(每个)粒子在第  $k+1$  次迭代获得的新解与其第  $k$  次迭代的个体极值进行比较。若  $p^k$  E 占优于新解,则个体极值保持不变;若新解 E 占优于  $p^k$ ,则将新解更新为个体极值;若新解与  $p^k$  互不占优,则从两者随机选择一个更新为个体极值。

当粒子群算法在处理多目标优化问题时,群体极值不再是一个单独的解,而是存于外部档案的一组解。传统方法是根据拥挤距离的大小选择群体极值,这种处理方法虽然可以保证种群的多样性,但仍旧没有考虑已知的偏好知识。本文方法是求出各个解对应的多目标综合值之后,再根据轮盘赌策略

选择群体极值。这样被选为群体极值的概率与综合值的大小有关, 使得群体极值的选择可以受到决策者的偏好知识的指导。同时因为也有一定概率选择了综合值较小的解, 在一定程度上也保证了种群的多样性。

### 3.4 多目标二进制粒子群算法流程

本文在粒子编码及保证网络拓扑约束的问题上采用文献[5]所述方法。

在 E 占优策略的基础上, 多目标二进制粒子群算法流程如下:

(1) 输入基本电气信息、算法参数、指标权重值和最大迭代次数;

(2) 初始化粒子的速度、Sigmoid 函数和位移, 令  $k=1$ ;

(3) 根据 E 占优策略, 选择不受占优的解存入外部档案中, 采用轮盘赌策略选择群体极值, 将当前粒子作为个体极值;

(4) 更新粒子的速度、Sigmoid 函数和位移, 使得  $k=k+1$ ;

(5) 根据 E 占优策略对外部档案进行维护, 采用本文所述方法对个体和群体极值进行更新;

(6) 判断  $k$  是否小于最大迭代次数, 若小于则跳转步骤(4); 否则输出当前外部档案。

## 4 算例分析

本文采用如图 1 所示的 69 节点配电网为例, 该电网额定电压为 12.66 kV, 共有 69 个节点、73 条支路, 总负荷为  $3801.9+j2694.1$  kVA, 本文假设 73 条支路均装设具有三遥功能的开关设备, 图中实线和虚线表示处于闭合和断开状态, 节点编号、支路编号、节点负荷和支路容量参考文献[15]。

各个指标的权重值为 0.4、0.325、0.05、0.125、0.1, 分别对应失电负荷、开关操作次数、网损、载荷平衡、电压质量。种群规模和外部档案容量取为 40, 惯性权重取为 0.2, 学习因子都取为 2。

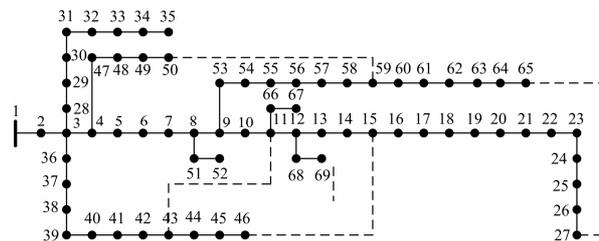


图 1 69 节点配电系统单线图

Fig. 1 Single line diagram of 69-bus distribution system

假设 4-5 发生永久性故障而退出运行, 非故障失电区域负荷为  $2676.3+j1894.5$  kVA。

表 1 为基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的二进制粒子群算法得出的最优前沿, 即故障恢复方案。表 2 为本文算法得出的最优前沿, 并且计算出了各个方案的综合值。从表 2 列出的综合值可以看出, 4-5、58-59、13-21、15-46、27-65 为指导工程实践的最佳方案, 并且两种占优机制均得到了该方案, 这也表明了本文方法的有效性。值得说明的是, 由于节点 56、57、58 负荷值为 0, 所以该方案中打开 55-56、56-57、57-58 或 58-59 在各项指标上具有一样的效果。

从表 1 和表 2 可以看出, 本文方法得到的最优前沿个数较少, 而这一现象在迭代过程中尤为明显。这是因为 Pareto 占优机制中将各个指标视为同等重要, 而由于 E 占优机制中融入了权重的因素, 进而导致了一些解的淘汰, 这就使得 E 占优机制下的外部档案存放的个数更少、质量更高, 这也方便了运行人员进行择优选择。

表 1 基于 Pareto 的故障恢复结果

Table 1 Results of service restoration based on Pareto

恢复方案	失电负荷/kW	开关动作次数	网损/kW	载荷平衡	最低电压
4-5;58-59;13-21;15-46;27-65	0	3	138.82	0.957 8	0.935 0
4-5;12-13;56-57;13-21;27-65	0	5	131.53	0.956 2	0.935 0
4-5;58-59;64-65;13-21;15-46	0	5	135.80	0.957 0	0.938 2
4-5;14-15;58-59;61-62;13-21	0	7	115.16	0.951 9	0.949 5
4-5;9-53;63-64;11-43;13-21	0	5	143.20	0.958 0	0.946 3
4-5;10-11;61-62;11-43;13-21	0	5	142.90	0.958 4	0.941 8
4-5;9-10;63-64;11-43;13-21	0	5	142.82	0.958 4	0.941 4
4-5;9-53;61-62;11-43;13-21	0	5	143.27	0.957 9	0.945 4
3-4;4-5;20-21;63-64;11-43	0	7	207.82	0.967 7	0.985 1
3-4;4-5;19-20;63-64;11-43	0	7	162.94	0.866 6	0.971 0
4-5;53-54;62-63;13-21;15-46	0	5	137.82	0.957 0	0.935 4



表 2 基于 E 占优的故障恢复结果

Table 2 Results of service restoration based on E-optimality

恢复方案	失电负荷/kW	开关动作次数	网损/kW	载荷平衡	最低电压	综合值
4-5;58-59;13-21;15-46;27-65	0	3	138.82	0.957 8	0.935 0	0.675 0
4-5;14-15;58-59;61-62;13-21	0	7	115.16	0.951 9	0.949 5	0.725 0
4-5;12-13;55-56;27-65;13-21	0	5	131.53	0.956 2	0.935 0	0.788 2
4-5;14-15;56-57;63-64;13-21	0	7	115.51	0.952 0	0.948 3	0.736 1

由于不同占优机制得出的最优前沿是不同的，而故障恢复问题最终仅需其中的一个方案去指导工程实践。为方便这两种占优机制进行比较，图 2 给出了基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的二进制粒子群算法和本文算法在 10 次单独计算过程中，方案(4-5、58-59、13-21、15-46、27-65)在迭代过程中出现的代数。基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的二进制粒子群算法的平均迭代次数为 15.6，而本文算法的平均迭代次数为 11.5。可以得出本文算法迭代次数更少，更容易收敛。这是因为本文算法在迭代过程中考虑了权重的因素，“人为”地使粒子向希望的方向移动，从而加速了收敛。

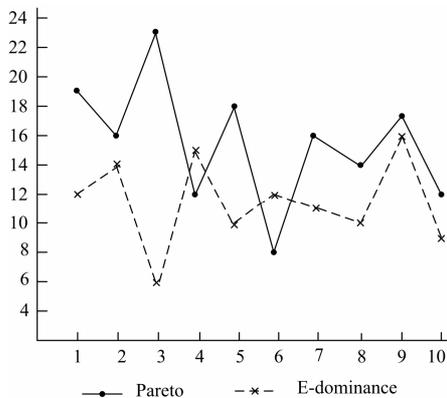


图 2 收敛次数趋势图

Fig. 2 Tendency graph of convergent time

在 4-5 发生永久性故障而退出运行的问题上，本文并未在算法中设置变异机制就可以得出较为满意的结果，这是因为多目标算法的个体极值和群体极值的选择更加多变，从而保证了种群的多样性，在一定程度上克服了传统单目标智能算法容易陷入局部最优的问题。

### 5 结论

针对基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的多目标智能算法的缺陷，本文提出了基于 E 占优的多目标

二进制粒子群算法求解配电网故障恢复问题。在迭代过程中，采用 E 占优机制对故障恢复方案进行评价，采用轮盘赌策略更新群体极值，采用方案的综合值对外部档案进行维护，使得将决策者的偏好知识很好地融入了多目标算法当中。最后，通过算例表明了本文所提方法的有效性和可行性，比基于 Pareto 占优机制和拥挤距离的多目标智能算法的收敛性更好，并且 E 占优机制易于应用和改进当前基于 Pareto 占优机制的经典多目标智能算法。

### 参考文献

- [1] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.  
LIU Li, CHEN Xue-feng, ZHAI Deng-hui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [2] 王增平, 张丽, 徐玉琴, 等. 含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 8-14.  
WANG Zeng-ping, ZHANG Li, XU Yu-qin, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 8-14.
- [3] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.  
XU Yu-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [4] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.

- LI Zhen-kun, CHEN Xing-ying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
- [5] 卢志刚, 杨国良, 张晓辉, 等. 改进二进制粒子群优化算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 30-34.
- LU Zhi-gang, YANG Guo-liang, ZHANG Xiao-hui, et al. Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 30-34.
- [6] 郇嘉嘉, 黄少先. 基于免疫原理的蚁群算法在配电网恢复中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 89-93.
- HUAN Jia-jia, HUANG Shao-xian. Ant colony algorithm based on immune principle for the fault restoration of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 89-93.
- [7] 蒋燕君, 姜建国, 乔树通. 采用本质多目标进化算法的舰船电网故障智能恢复决策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 118-124.
- JIANG Yan-jun, JIANG Jian-guo, QIAO Shu-tong. Intelligent service restoration of shipboard power network using nature multiobjective evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 118-124.
- [8] 黄弦超, 张粒子, TAYLOR G. 考虑负荷控制的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 22-26.
- HUANG Xian-chao, ZHANG Li-zi, TAYLOR G. Service restoration of power distribution systems with load control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 22-26.
- [9] 黄弦超, TAYLOR G. 基于节点深度编码技术的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 40-39.
- HUANG Xian-chao, TAYLOR G. Service restoration of distribution networks based on node-depth encoding technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 40-39.
- [10] 李伟, 张振刚, 闫宁. 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 Zhen-gang, YAN Ning. Pareto multi-objective distribution network reconfiguration based on improved niche genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 1-5.
- [11] KANG Zhuo, KANG Li-shan, ZOU Xiu-fen, et al. A new evolutionary decision theory for many-objective optimization problems[C] // Proc of the 2nd International Conference on Advances in Computation and Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 1-11.
- [12] KANG Zhuo, KANG Li-shan, LI Chang-he, et al. Convergence properties of E-optimality algorithms for many objective optimization problems[C] // 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC 2008), Hong Kong, 2008: 472-477.
- [13] LI X D. A nondominated sorting particle swarm optimizer for multi-objective optimization[C] // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation (GECCO 2003), Germany, Berlin, 2003: 37-48.
- [14] COELLO C, CARLOS A, LECHUGA M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization[C] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE, Honolulu, USA, 2002: 1051-1056.
- [15] SAVIERJ S, DAS D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(4): 2473-2480.

---

收稿日期: 2014-02-16; 修回日期: 2014-06-12

作者简介:

姚玉海(1986-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自愈控制; E-mail: yao\_yuhai@163.com

王增平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制;

郭昆亚(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。