

# 基于改进小生境遗传算法的 Pareto 多目标配电网重构

李伟, 张振刚, 闫宁

(华北电力大学经济与管理学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 配电网重构是一个多目标、多约束的复杂非线性组合优化问题, 若采用传统的遗传算法处理此类问题, 由于其易于陷入局部最优解和随着配电网规模的扩大搜索效率低的问题, 难以得到理想结果。建立了 Pareto 多目标重构数学模型并提出一种改进小生境遗传算法来处理配电网重构问题。算法主要有以下几种特点: 设置个体之间的距离判别标准  $L$  为动态函数, 保持了种群的多样性; 采用最优保存策略, 提高了算法的收敛速度; 交叉、变异采用自适应规则, 避免了算法陷入局部最优的情况。另外, Pareto 多目标数学模型的引入也使算法更具实际工程意义, 采用国外一个实际的配电网对算法进行了验证。理论分析和算例表明, 该算法具有高收敛性、快实时性和强全局稳定性的优点。

**关键词:** 配电网重构; Pareto 多目标; 小生境遗传算法; 自适应; 动态距离判别标准; 最优保存策略

## Pareto multi-objective distribution network reconfiguration based on improved niche genetic algorithm

LI Wei, ZHANG Zhen-gang, YAN Ning

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Distribution network reconfiguration is a complex non-linear combinatorial optimization problem with multi-objective and multi-constrained features. If the traditional genetic algorithm is used to deal with these problems, it is difficult to obtain the desired result because it is easy to fall into local optimal solution and it has the problem of low search efficiency with the expansion of distribution network. This paper establishes the Pareto multi-objective mathematical model of reconfiguration and presents an improved niche genetic algorithm to deal with the issue of distribution network reconfiguration. This algorithm is mainly characterized by the following: setting the distance criterion  $L$  between individuals as dynamic function to maintain the population diversity; using the elitist strategy to enhance the convergence speed of the algorithm, and applying the adaptive rules when crossover and mutation to avoid falling into local optimal. In addition, the introduction of the Pareto multi-objective mathematical model makes the algorithm possess more practical engineering significance, and an abroad real distribution network is used to prove the algorithm. Theoretical analysis and example show that this algorithm has high convergence, strong real-time and global stability.

**Key words:** distribution network reconfiguration; Pareto multi-objective; niche genetic algorithm; adaptive; dynamic distance criterion; elitist strategy

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011) 05-0001-05

## 0 引言

配电网重构是一个复杂的、多目标、多约束的非线性规划问题。重构的方法有很多, 现有算法有的将启发式算法<sup>[1-3]</sup>应用于求解此类问题, 该类算法速度快, 但是由于其依赖于网络的初始结构所以很难得到全局最优解。模糊算法<sup>[4-5]</sup>虽然能解除其他算法的死约束, 但是各指标的模糊化处理及配合中的参数选取是非常困难的。遗传算法<sup>[6-8]</sup>能够以很大的概率找到全局最优解, 但是它的计算速度过慢。专家系统<sup>[9]</sup>的知识库的建立和维护都比较困难。Petri网法由于其与网络结构联系紧密, 所以一旦网

络结构发生变化必须重新修改。而且大部分的解决方法都是以单目标或多目标加权成单目标的形式进行分析。单一目标不能完整地反映实际配电网运行要求, 而加权的方法则更加依赖于人的经验。

小生境遗传算法<sup>[10]</sup>具有很高的全局寻优能力和收敛速度, 在保持解的多样性方面表现优异。但传统的小生境遗传算法个体距离判别标准和交叉、变异等遗传操作步骤一般都被预先设定为定值, 不能随着进化过程而发展变化, 算法保持群体多样性的能力得不到充分发挥。

本文针对以上对配电网重构中存在的问题提出了基于改进小生境遗传算法的Pareto多目标配电网

重构。在算法的改进方面：设置个体之间的距离判别标准 $L$ 为动态函数<sup>[11]</sup>，交叉、变异等遗传操作步骤采用改进自适应规则<sup>[12]</sup>。这些改进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充分的发挥。在目标函数方面：以网络线损最小、节点最低电压幅值、支路电流负荷比最大值、操作开关次数为综合目标函数，运用改进小生境遗传算法搜寻Pareto可行解。

## 1 配电网重构的Pareto多目标数学模型

### 1.1 Pareto最优的概念

在进行配电网多目标重构时，使各个目标函数同时达到最优的情况很难出现，于是解决多目标重构问题的最终手段就是在目标函数之间进行协调和折中，使目标函数尽可能地达到最优，因而出现了基于权重系数多目标算法。如前所述，这种多目标算法对经验知识的要求比较高。另外，不同目标的单位也不一样，不易直接比较。同时，各目标之间通过决策变量相互制约，往往存在相互矛盾的指标。为此，本文采用Pareto最优的概念来解决多目标重构问题。

对于两个决策变量 $u$ 和 $v$ ，且 $u, v \in S$ ， $S$ 为决策变量空间，对任意的 $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ， $f_i(u) \leq f_i(v)$ ，并且存在 $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ，使得 $f_i(u) < f_i(v)$ 成立，则称决策变量 $u$ 支配 $v$ ，记为 $u \succ v$ 。

对于多目标优化问题的一个可行解 $x \in S$ ，当且仅当 $S$ 中不存在 $y$ ，使 $y \succ x$ ，即 $x$ 是 $S$ 中的非支配个体，称 $x$ 为多目标优化问题的Pareto最优解。即所谓Pareto最优解就是不存在比这个方案至少一个目标更好而其他目标不低劣的更好的解，也就是不可能优化其中部分目标而使其他目标不劣化。通常多目标优化问题的Pareto最优解是一个集。对于实际应用问题的最后方案决策，必须根据对问题的了解程度和决策人员的偏好，从多目标优化问题的Pareto最优解集里面挑选出一个或部分解作为所求多目标优化问题的最优解<sup>[13]</sup>。因此求解多目标问题的首要步骤和关键是求出尽可能多的Pareto最优解。

### 1.2 目标函数

本文将有功网损最小作为第一目标函数。配电网的网损包括线路上导线的损耗以及变压器的铜损及铁损等，一般通过配电网重构只能影响前者，所以网损最小的目标函数为<sup>[14]</sup>：

$$\text{Minimize } L = \sum_{i=1}^{N_b} R_i (P_i^2 + Q_i^2) / U_i^2 = \sum_{i=1}^{N_b} R_i I_i^2$$

式中： $N_b$ 表示网络中的支路总数； $P_i$ 和 $Q_i$ 表示流

过支路 $b_i$ 的有功功率和无功功率； $R_i$ 表示支路 $b_i$ 的支路电阻； $U_i$ 表示支路 $b_i$ 的末端电压。

约束条件为：

$$\textcircled{1} \text{ 电压幅值: } V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max}; \quad \forall i, i \in N_R$$

$$\textcircled{2} \text{ 电流偏移: } |I_j| \leq I_{j,\max}; \quad \forall j, j \in N_b$$

$\textcircled{3}$  供电约束：配电网必须满足负荷的要求，而且不能有孤立节点（即“孤岛”）。

$\textcircled{4}$  网络拓扑约束：配电网一般为闭环设计、开环运行，这就要求重构后的配电网必须为辐射状。

约束条件中： $|V_i|$ 是母线 $i$ 上的电压； $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别是母线电压的最大值和最小值； $|I_j|$ 是支路 $j$ 的电流幅值； $I_{j,\max}$ 是支路上 $j$ 允许通过的电流最大值； $N_b$ 和 $N_R$ 分别是支路和节点集合。

其次，在降低网络有功损耗的同时，系统电能质量也是现代电力系统较为关注的一个方面。配电网中各节点电压偏离标准电压幅值的大小，一定程度上反映了配电网系统的电能质量。目标函数可表示为<sup>[15]</sup>：

$$\text{Maximize: } \{ |1 - \min(V_n)|, |1 - \max(V_n)| \}, \quad n \in N_R$$

由于配电网在运行时呈辐射状，使得配电网中各节点电压从电源点向末梢点逐次降低，因此监测配电网中电压最低点的幅值大小同样能够达到与上式相同的目的。此时目标函数可以简化成：

$$\text{Maximize: } \{ \min(V_n) \}, \quad n \in N_R$$

其中： $V_n$ 表示节点电压； $N_R$ 表示网络中节点总数。

网络重构的最终方案由一些开关操作构成，开关闭合和断开都会对开关的寿命产生影响。从延长开关寿命方面考虑，结合操作安全性因素，以及进行操作所需的人力和时间，应该尽量减少对开关的频繁操作，使开关操作的次数尽可能少。目标函数可表示为<sup>[16]</sup>：

$$\text{Minimize: } n_{\text{op}}$$

其中， $n_{\text{op}}$ 表示开关操作次数。

系统上各条支路负荷是否均衡，也逐渐成为系统所关注的目标。所有支路电流负荷比的最大值越小，反映出系统各条支路上的负荷越均衡。该目标函数可以表示为<sup>[17]</sup>：

$$\text{Minimize: } \{ \max(I_{ni} / I_{nrate}) \}, \quad n \in N_b$$

其中： $I_{ni}$ 表示支路实际流过的电流； $I_{nrate}$ 表示支路电流额定值； $N_b$ 表示网络中支路总数。

## 2 小生境遗传算法

小生境遗传算法 (Niche Genetic Algorithm, NGA) 将个体之间的海明距离作为一种共享函数来调节群体中各个体的适应度。算法的基本思想是: 首先两两比较群体中各个体之间的海明距离; 若在预先的距离  $L$  之内的话, 再比较两者之间的适应度大小; 并对其中适应度较小的个体施加一个较强的罚函数, 降低其适应度; 这样在预先指定的某一距离  $L$  之内的两个个体, 其中较差的个体经处理后适应度将变得更差, 它在后面的进化过程被淘汰的概率也越大。也就是说, 在距离  $L$  内将只存在一个优良个体。这种方法既维护了群体的多样, 又使得各个体之间保持一定的距离, 而且使得个体能够在整个约束的空间中分散开来, 实现小生境遗传算法<sup>[18]</sup>。

小生境遗传算法的操作步骤如下:

1) 设置进化代数计数器  $t = 1$ 。随机生成初始种群  $P(t)$  ( $M$  个个体), 并求出各个体的适应度  $F_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 。

2) 依据各个体的适应度进行降序排列, 记忆前  $N$  个个体 ( $N < M$ )。

3) 选择算法。对群体  $P(t)$  进行比例选择计算, 得到  $P'(t)$ 。

4) 交叉选择。对选择的个体集合  $P'(t)$  进行算数均匀交叉运算, 得到  $P''(t)$ 。

5) 变异运算。对  $P''(t)$  进行均匀变异运算, 得到  $P'''(t)$ 。

6) 计算  $P'''(t)$  的适应度。

7) 小生境淘汰运算。将步骤 5) 得到的  $M$  个个体和步骤 2) 所记忆的  $N$  个个体合并在一起, 得到一个含有  $M + N$  个个体的新群体。对这  $M + N$  个个体, 计算  $X_i, X_j$  之间的海明距离:

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

$$i = 1, 2, \dots, M + N - 1; \quad j = i + 1, \dots, M + N$$

当  $\|X_i - X_j\| < L$  ( $L$  为指定的距离) 时, 比较个体  $X_i$  和  $X_j$  的适应度大小, 并对其中适应度较低的个体处以惩罚。

8) 依据这  $M + N$  个个体的新适应度进行降序排列, 记忆前  $N$  个个体。

9) 判断终止条件。若不满足终止条件, 则更

新进化代数记忆器  $t = t + 1$ , 并将步骤 7) 排列中的前  $M$  个个体作为新的下一代群体  $P(t)$ , 然后转到步骤 3); 若满足终止条件, 则输出计算结果, 算法结束。

## 3 改进小生境遗传算法

为了提高小生境遗传算法的全局寻优能力, 加快优化速度, 本文对传统小生境遗传算法作了如下改进:

1) 设置个体间距离判别标准  $L$  为动态函数<sup>[11]</sup>。

首先将  $L$  设定为所有个体间海明距离的平均值, 即  $L = \frac{\sum_{i=1}^{i=M+N-1} \sum_{j=i+1}^{M+N} d_{ij}}{\sum_{i=1}^{i=M+N-1} \sum_{j=i+1}^{M+N}}$ 。随着进化的发展, 个体的海明距离也会发生变化, 其判定标准  $L$  也会动态变化。

再将种群的繁殖代数  $t$  引入距离判别函数, 将个体间的距离判别标准设为动态函数  $L' = L/t$ , 这样保证了进化初期的个体都具有较大的差异, 种群拥有非常大的多样性。

2) 采用最优保存策略。

选择最好适应度的个体作为种子选手, 直接保留到下一代。该策略可以保证所得到的最优个体不会被交叉、变异等操作破坏, 它有效地提高了遗传算法的收敛速度。

3) 采用自适应规则<sup>[12]</sup>。

控制参数的调整主要是对交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$  进行的。交叉操作是遗传算法产生新个体的主要方法,  $P_c$  一般应取较大值。但若取值过大, 易于破坏群体中的优良个体; 若取值过小, 产生新个体的速度又太慢,  $P_c$  的范围一般为  $0.4 \sim 0.99$ 。变异操作是产生新个体的必不可少的辅助方法, 若  $P_m$  取值较大, 有可能破坏掉很多较好的个体, 使得算法的性能近似于随机搜索的性能; 若  $P_m$  取值太小, 则变异操作产生新个体的能力和抑制早熟现象的能力较差, 一般地  $P_m$  范围为  $0.001 \sim 0.1$ 。由上可知,  $P_c$  和  $P_m$  越大, 算法产生新个体的能力就越强, 个体之间的适应度波动比较大;  $P_c$  和  $P_m$  越小, 算法使个体趋于收敛的能力越强, 个体的平均适应度比较平稳, 有可能产生早熟现象。

采用自适应思想, 在算法的运行过程中对  $P_c$  和  $P_m$  进行调整, 其计算公式为:

$$P_c(\text{gens}) = P_c(1) - (\text{gens} - 1) \times c / \text{gens max}$$

$$P_m(\text{gens}) = P_m(1) - (\text{gens} - 1) \times m / \text{gens max}$$

式中:  $\text{gens}$  是遗传操作的代数;  $\text{gens max}$  是最大遗

传代数;  $P_c(1), P_m(1)$  分别是初始交叉率和变异率;  $c$  和  $m$  分别为交叉率与变异率的比例系数;  $P_c(gens), P_m(gens)$  分别是第  $gens$  代的交叉率和变异率。

改进小生境遗传算法求解配电网重构的步骤如图 1 所示。

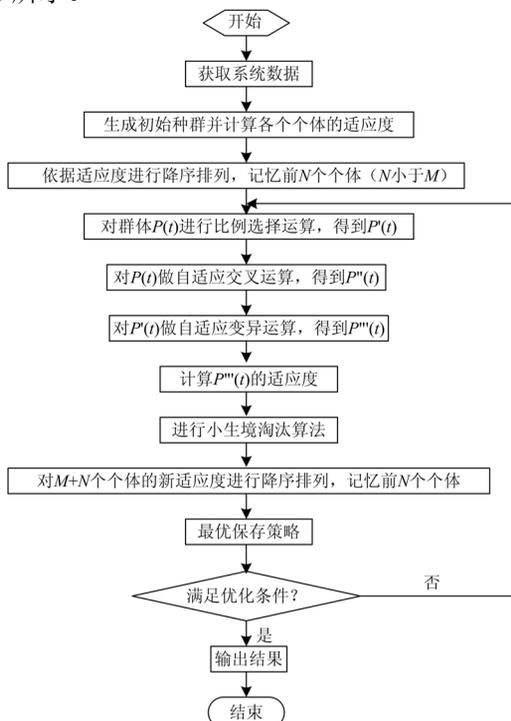


图 1 改进小生境遗传算法流程图

Fig.1 Flow chart of improved niche genetic algorithm

### 4 算例结果与分析

该系统为国外一实际配电网<sup>[19]</sup>, 具有 4 条馈线, 68 条线路, 11 条联络开关支路, 基准电压为 11 kV。所有的程序在 Matlab 平台上仿真运行。该

网络结构如图 2 所示。

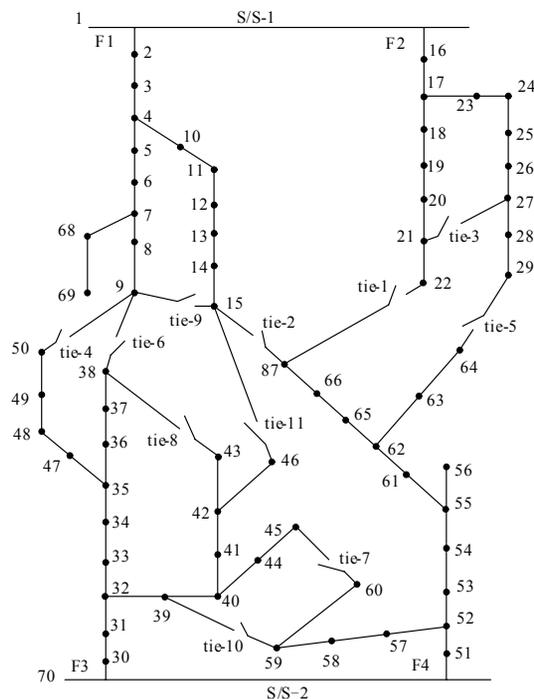


图 2 配电网结构及初始状态图

Fig.2 Structure of the distribution network and its initial state

算法参数设置如下: 种群规模取为 100, 初始交叉率为 0.4, 初始变异率为 0.01, 交叉率和变异率随着进化代数的增加而自适应变化。经过多次迭代, 交叉率和变异率比例系数  $c, m$  分别取 0.4 和 0.19 时迭代结果最佳。

运用前面章节提到的改进小生境遗传算法来解决这个问题, 在求解的时候选取了网络有功损耗最小、节点最低电压幅值、开关操作次数、支路电流负荷比最大值四个目标函数, 得到一组重构方案, 如表 1 所示。

表 1 多目标重构结果

Tab.1 Result of the multi-objective reconfiguration

方案	网络损耗 /kW	节点最低电压幅值/p.u	操作开关次数	支路电流负荷比最大值/p.u	操作开关编号
方案 1	207.7	0.928 9	2	0.608 3	45, 67, 69, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 79
方案 2	206.3	0.928 8	3	0.571 3	38, 45, 67, 69, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 79
方案 3	204.4	0.930 5	3	0.618 6	30, 46, 66, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 78, 79
方案 4	204.7	0.928 5	4	0.550 7	28, 46, 51, 67, 70, 71, 73, 75, 76, 78, 79
方案 5	204.6	0.934 9	4	0.603 2	30, 51, 61, 66, 70, 71, 75, 76, 77, 78, 79
方案 6	209.5	0.935 6	5	0.689 8	14, 30, 51, 60, 66, 70, 74, 75, 77, 78, 79
方案 7	204.4	0.935 6	5	0.622 7	14, 30, 51, 61, 66, 70, 75, 76, 77, 78, 79
方案 8	203.9	0.932 8	6	0.588 7	14, 30, 39, 46, 47, 66, 69, 70, 76, 77, 79
方案 9	201.6	0.931 7	6	0.557 4	14, 30, 39, 45, 51, 66, 70, 76, 77, 78, 79

从该仿真算例的结果来看, 运用本章的方法得到了一组重构结果, 为决策者提供了更多的选择方案。决策者可以结合实际的情况, 在其中选出适宜的重构方案。这比以网络损耗为单一目标得出的单个最优解有更好的实用性和合理性。

## 5 结论

配电网是电力生产和供应的最后环节, 网络重构是电力系统配电自动化功能中极其重要的一个环节, 是提高配电系统安全性和经济性的重要手段。本文将网络损耗、节点最低电压幅值、支路电流负荷比最大值、操作开关次数作为配电网重构的四个目标, 以此为基础建立了 Pareto 多目标数学模型, 并以改进的小生境遗传算法为手段解配网重构问题。本文以国外一个实际的配电系统为算例对算法进行了试算, 并对仿真结果进行了具体分析, 验证了用于配电网重构的改进小生境遗传算法的有效性和快速收敛性, 实例表明所用方法相对于单目标和加权多目标寻优显示了良好的优越性, 为决策者提供了更多的重构选择, 具有非常重要的实际意义, 进一步拓展了遗传算法在配电网重构中的应用。

## 参考文献

- [1] Morelato A L, Monticelli A. Heuristic search approach to distribution system restoration[J]. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4 (4): 2235-2241.
- [2] Talor T, Lubkeman D. Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration[J]. IEEE Trans on PWRD, 1990, 5 (1): 239-246.
- [3] Wu J S, Tomsovic K L, Chen C S. A heuristic search approach to feeder switching operations for overload, faults, unbalanced flow and maintenance[J]. IEEE Trans on PWRD, 1991, 6 (4): 1579-1585.
- [4] Lee Seung-Jae, Lin Seong-Il, Ahn Bok-Shin. Service restoration of primary distribution systems based on fuzzy evaluation of multi-criteria[J]. IEEE Trans on PWRS, 1998, 13 (3): 1153-1163.
- [5] 颜萍, 顾锦汶, 张广. 一种快速高效的配电网供电恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (4): 52-56.  
YAN Ping, GU Jin-wen, ZHANG Guang. A fast efficient restoration algorithm for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (4): 52-56.
- [6] Fukuyama Y, Chiang H K, Miu K N. Parallel genetic algorithm for service restoration of distribution systems[J]. IEEE Trans on PWRS, 1998, 3 (2): 20-25.
- [7] Bretas N G, Delbem A C B, de Carvalho A. Optimal energy restoration for general distribution system by genetic algorithms[C]. //International Conference on Power System Technology, 1998, 1: 43-47.
- [8] Mun Kyeong Jun, Park J H, Kim Hyung-Su, et al. Development of real-time-service restoration system for distribution automation system[C]. //IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001, 3: 1514-1519.
- [9] 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): 28-31.  
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): 28-31.
- [10] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Principle and application of genetic algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [11] 张敬平, 梁志瑞, 苏海锋, 等. 基于改进排挤小生境遗传算法配电网无功优化研究[J]. 继电器, 2007, 35(10): 19-22.  
ZHANG Jing-ping, LIANG Zhi-rui, SU Hai-feng, et al. Research on reactive power optimization of distribution network based on the improved crowding niche genetic algorithm[J]. Relay, 2007, 35 (10) : 19-22.
- [12] 夏媚珠. 基于改进遗传算法配电网重构的研究[D]. 桂林: 广西大学, 2004.  
XIA Mei-zhu. Based on improved genetic algorithm for distribution network reconfiguration studies[D]. Guilin: Guangxi University, 2004.
- [13] Yogendra Kumar, Biswarup Das, Jaydev Sharma. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (1): 261-269.
- [14] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Simplify the complex analysis and optimization of distribution network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [15] Ashish Ahuja, Sanjoy Das, Anil Pahwa. An AIS-ACO hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1101-1111.
- [16] 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 Jin-xin, LIU Tian-qi, LIU Hui-le. Distribution network reconfiguration with Pareto multi-objective based on Niche[J]. Relay, 2005, 33(8): 13-17.
- [17] 刘育明. 配电网故障诊断与快速供电恢复算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.

[7] 王同勋, 薛禹胜, Choi S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (9) : 101-107.  
WANG Tong-xun, XUE Yu-sheng, Choi S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (9) :101-107.

[8] 王德发, 丁洪发. 基于不对称级联型多电平逆变器的动态电压恢复器研究[J]. 继电器, 2007, 35(13): 49-52.  
WANG De-fa, DING Hong-fa. Simulation of dynamic voltage restorer based on asymmetry cascade multilevel inverter[J]. Relay, 2007, 35(13): 49-52.

[9] Jauch T, Kara A, Rahmani M, et al. Power quality ensured by dynamic voltage correction[J]. ABB Review, 1998, 4: 25-36.

[10] Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1) : 51-57.

[11] Li B H, Choi S S, Vilathgamuwa D M. A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration[C]. //Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle,USA, 2000, 2: 167-181.

[12] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (6) : 68-72.

FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (6) : 68-72.

[13] Vilathgamuwa D M, Perera A A D R, Choi S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3) : 928-936.

[14] Nielsen J G, Blaabjerg F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2005, 41 (5) : 1272-1280.

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

党存禄 (1964-), 男, 教授, 本科, 主要研究方向为电气传动、谐波抑制与无功补偿、电压跌落补偿; E-mail: dcl\_1964@163.com

严 鋈 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电压跌落补偿;

张晓英 (1973-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 5 页 continued from page 5)

LIU Yu-ming. Distribution network fault diagnosis and rapid power restoration algorithms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[18] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, 104 (5) : 1147-1153.

[19] Debapriya Das. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE

Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1): 202-209.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

李 伟 (1968-), 男, 教授, 在读博士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用;

张振刚 (1977-), 男, 经济师, 硕士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用。E-mail: zhangzhengangwf@126.com

(上接第 10 页 continued from page 10)

[16] Lee Y, Kozar K A. Investigating the effect of website quality on business success: an analytic hierarchy process approach[J]. Decision Support Systems, 2006, 42 (3) : 1383-1401.

[17] Ngai E W T. Evaluation of knowledge management tools using AHP[J]. Expert Systems with applications, 2005, 29 (4) : 889-899.

[18] Bertolini M, Braglia M. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract[J]. International Journal of Project Management, 2006, 24 (5) : 422-430.

[19] Odum H T. Systems ecology: an introduction[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[20] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 系统边际电价概率分布检验

及模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4) : 72-77.

LIU Xi-chui, SHEN Jiong, LI Yi-guo. Study on probability distribution and model of system marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (4) : 72-77.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

柏小丽 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场的研究; E-mail: bxueer2003@eyou.com

雷 霞 (1973-), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事配电自动化和电力市场的研究。E-mail: snow\_lei246@sina.com