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

徐玉琴　张丽　王增平　李雪冬

（华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室　保定　071003）

摘要　当配电网发生大面积断电事故后，针对含分布式电源的配电系统，提出采用多智能体遗传算法解决分布式发电条件下配电网大面积断电供电恢复问题。考虑孤岛运行的情况，研究了分布式电源在配电网大面积断电情况下的分层孤岛运行方式，能够充分利用分布式电源的发电能力，减少停电区域。提出的多智能体遗传算法构造了一个环形网格环境，所有智能体都固定在网格上。每个智能体相当于遗传算法中的一条染色体，它们通过与其邻域展开竞争操作和自学习行为来增加目标函数值。对于智能体竞争及自学习行为过程中产生的不可行解，采用改进的基于环路分解的方法消除闭环和孤岛，使其变为可行解。通过一个实际配电系统的仿真计算，仿真结果证明了文中所提方法具有较强的全局搜索能力和快速的收敛速度。

关键词：配电网　供电恢复　多智能体遗传算法　分布式电源

中图分类号：TM728

Algorithm of Service Restoration for Large Area Blackout in Distribution Network With Distributed Generators

Xu Yuqin　Zhang Li　Wang Zengping　Li Xuedong

（Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education　North China Electric Power University　Baoding　071003　China）

Abstract　In the event of a large-scale blackout in a distribution network, a service restoration plan must be devised quickly. To remedy such a situation, a restoration method based on the multi-agent genetic algorithm is proposed for the distribution networks with distributed generators (DGs). All agents in this algorithm which represent the restoration methods live in a lattice like environment, with each agent fixed on a lattice-point. In order to increase object function values, they compete with their neighbors, and they can also use knowledge. For the non-feasible solutions generated in the process of the algorithm, the method of the improved loop decomposition is proposed to eliminate the closed loops and islands. The operation method of DGs is the process of service restoration for large area blackout of distribution system with DGs is researched for making use of the capacity of DGs sufficiently and enhancing the power distribution reliability. Finally, the example results indicate the feasibility of the proposed method.

Keywords：Distribution network, service restoration, multi-agent genetic algorithm, distributed generation

收稿日期　2009-05-10　改稿日期　2009-12-25

1　引言

在配电网的故障管理中，供电恢复是一个非常

重要的环节。配电网供电恢复属于一个多目标、多约束、非线性的整数组合优化问题，国内外学者已提出了多种方法解决此问题，如遗传算法[1-3]、禁忌搜索法[4]、专家系统[5]、启发式方法[6]等。为确保配电网坚强和避免长时间大面积停电，近年来亦有文献探讨了配电网大面积断电恢复问题[7-9]。

当前，分布式发电（Distributed Generation，DG）技术在全球的发展很快。在大电网供电的基础上，在配电系统靠近用户侧引入容量不大（一般小于 50MW）的分布式电源供电，可以综合利用现有资源和设备，向用户提供可靠、优质的电能。但DG 的引入使得配电系统从单电源辐射式网络变为双端或多端有源网络，配电系统的结构和运行都发生了巨大变化[10-12]，因而，引入 DG 后的配电网大面积断电恢复不能直接套用传统算法。文献[13]在传统算法的基础上研究了包含 DG 的配电网故障恢复步骤，但对于配电网大面积断电情况效率较低。文献[14]在配电网发生故障时采取启发式的搜索策略，能够快速得到可行的孤岛划分方案，但只是针对树状配电网而言，不适用于实际系统中较为复杂的网格状配电网。文献[15]将包含 DG 的配网供电恢复问题转化为传统的配网重构问题，但并未研究如何确定供电恢复后 DG 的供电范围。并且相关文献均未涉及 DG 在供电恢复过程中的运行方式研究。

本文考虑故障后 DG 孤岛运行的情况，研究了DG 在配电网大面积断电情况下的运行方式。提出采用多智能体遗传算法解决包含 DG 的配电网大面积断电供电恢复问题。算例结果表明本文算法具有较快的收敛速度和较高的计算效率；并且结合DG 在故障恢复过程中的分层孤岛运行方式，能够充分利用 DG 的发电能力，提高供电可靠性。

2 包含 DG 的配电网大面积断电供电恢复模型

配电网由变电站母线、变压器、开关、联络开关、馈线、负荷等组成，在重构前应转化及简化为由边、顶点组成的网络图。将开关作为图的节点，开关间的馈线段、配电变压器和负荷形成图的边，这样整个配电网就形成了一个无向图，具体方法参见文献[16]。

本文考虑供电恢复的目标方程为恢复最多负荷（或甩负荷最少）和系统网络损耗最小。

$$f=\min\left\{\left(BL-\sum_{i\in\gamma}k_i\right)+A\left(P_{\text{loss.sys}}+\sum_{j=1}^{N}P_{\text{loss.island}\,j}\right)\right\} \tag{1}$$

式中，BL 为断电区域内的总断电负荷量；γ 为故障隔离后得到的断电区域的集合；k_i 为恢复的第 i 个负荷的负荷量；A 的取值为 0 和 1，当所有断电负荷均能恢复时，A 为 1 否则为 0；N 为供电恢复后，处在断电区域内的 DG 形成孤岛运行的数目，若处在断电区域内 DG 的数目为 M，则 $N\leqslant M$；$P_{\text{loss.sys}}$ 为不包括孤岛运行部分的配电系统的网络损耗；$P_{\text{loss.island}\,j}$ 为第 j 个孤岛的有功损耗。

配电网恢复的求解过程，即搜索满足配电网运行且使目标函数最大的解向量。配电网恢复问题约束通常包括：

（1）不包含 DG 时的网络辐射状运行约束。

（2）支路容量约束。

$$S_i<S_{i\max}\quad i=1,2,\cdots,n$$

式中，n 为支路总数；S_i 为支路 i 上的功率；$S_{i\max}$ 为支路 i 的线路容量。

（3）节点电压约束。

$$U_{i\min}\leqslant U_i\leqslant U_{i\max}\quad i=1,2,\cdots,m$$

式中，m 为节点总数；U_i、$U_{i\max}$ 及 $U_{i\min}$ 分别为节点的电压及其上、下限。

其中不等式约束可通过越界罚函数加入到目标函数中。

3 分布式电源在配电网大面积断电供电恢复过程中的运行方式

配电网故障发生后，当包含 DG 的电网与公共电网分离后，DG 仍继续向所在的独立电网供电，该部分独立运行的电网称为孤岛。单个 DG（或单元组合）可带本地负荷形成单元孤岛；多个DG 也可在故障后共同承担部分配电网负荷，形成多用户孤岛[17]。IEEE1547—2003 标准提出鼓励供电方和用户尽可能通过技术手段实现孤岛运行[12]。本文考虑的 DG 故障发生后均可作为系统的备用电源，且 DG 均可控，其操作状态可随时监测。当配电网发生大面积断电时，应充分利用 DG 的发电能力，减少停电区域，便于故障恢复，提高系统供电可靠性。

（1）系统发生故障后，处于断电区域的 DG，如果可以形成多用户孤岛运行，则解列生成多用户

孤岛；若多用户孤岛内功率缺额过大，则直接解列为多个单元孤岛。非断电区域的 DG 仍继续并网运行。

（2）采用供电恢复算法对断电区域进行恢复供电，可将孤岛看作可调度负荷。若断电区域相邻馈线的容量有限，独立运行的多用户孤岛仍处于断电区域中，则孤岛继续独立运行；否则多用户孤岛将并网运行。

（3）对于多个单元孤岛运行情况，如果单元孤岛周边负荷均未恢复供电则继续独立运行；否则单元孤岛并网运行。

分布式电源采用上述分层孤岛运行方式，处于断电区域时，能够尽可能地形成多用户孤岛运行，充分利用 DG 的发电能力，减少对系统备用的要求；当多用户孤岛运行失败后，进一步解列成单用户孤岛，尽可能地保证负荷供电。

4　配电网供电恢复的多智能体遗传算法

4.1　遗传算法和多智能体系统

遗传算法具有很强的全局优化解搜索能力，因此被广泛应用于传统配电网重构方案的搜索中。但其仍存在一些不足：①遗传算法只考虑到生物之间的竞争，而没有考虑到生物之间协作的可能性。而生物学证据表明竞争与协作并存能大大加快生物进化的历程。②生物进化过程是一个在环境生态系统中“学习”法则的过程，包括先天的遗传学习或遗传复制和后天的个体学习。但是以“生成检测”的遗传算法没有充分利用父代进化经验，而且忽视了个体的学习能力。由上述可得仅仅使用遗传算法来模仿生物处理事物的智能还是远远不够的，还必须深层挖掘与利用生物的智能资源。

近年来，分布式人工智能中基于智能体（Agent）的计算已经成功应用于电力系统领域[18-19]，而多个智能体为了达到特定目的进行相互作用而形成的系统就称为多智能体系统（MAS）。用 MAS 来解决问题时必须考虑三个因素：智能体生存的环境、每个智能体的目的和可以采取的行为。

多智能体遗传算法基于智能体对环境的感知和反作用的能力，将代表一种供电恢复方案的智能体固定在网格上，每个智能体为了增加自身能量与其邻域展开竞争，同样智能体也可进行自学习来增加能量。

4.2　智能体编码

配电网故障恢复的目标是得出一系列开关操作策略，由于配电网开关只存在开、合两种状态，故采用二进制编码方式。这种编码方式把停电区域的供电路径支路（跨接停电区域和非停电区域的支路）以及停电区域内节点之间的所有支路按其自然顺序进行排序，作为恢复决策时的可操作支路（不包括形成单元孤岛或多用户孤岛运行的支路），然后按上述顺序将每条可操作支路对应的开关作为智能体中的一个基因。可表示为

$$\boldsymbol{a}=(a_1,a_2,\cdots,a_n)\in S,\ a_i=0\text{或}1\quad 1\leqslant i\leqslant n$$

式中，$\boldsymbol{a}$ 代表一个智能体；n 为可操作支路数目；S 代表配电网供电恢复问题的搜索空间。

4.3　智能体的能量、目的及环境

智能体的能量等于由式（1）求得的目标函数值，即 $Energy(\boldsymbol{a})=f(\boldsymbol{a})$，智能体的目的就是最大化其能量。

智能体的生存环境为一个环形网络，称为智能体网格，记为 L。设智能体网格的规模为（$L_{\text{size}}\times L_{\text{size}}$），则其组织形式如图 1 所示，其中每个方框代表一个智能体，而框中的数字则为该智能体所处的行列位置，以下记处在第 i 行、第 j 列的智能体为 L_{ij}。每个智能体占一个格点位置且不能移动，但由于它能够感知其局部环境，因此它可与其周围的智能体发生相互作用，而能与其发生作用的智能体则由参数感知范围决定，记为 R_s。对于智能体 L，能与其发生相互作用的智能体为 $L_{k,l}$，$i-R_s\leqslant k\leqslant i+R_s$，$j-R_s\leqslant l\leqslant j+R_s$。

由于智能体网格为环形，因此

$$k=\begin{cases}k+L_{\text{size}} & k<1\\ k-L_{\text{size}} & k>L_{\text{size}}\end{cases},\quad l=\begin{cases}l+L_{\text{size}} & l<1\\ l-L_{\text{size}} & l>L_{\text{size}}\end{cases}$$

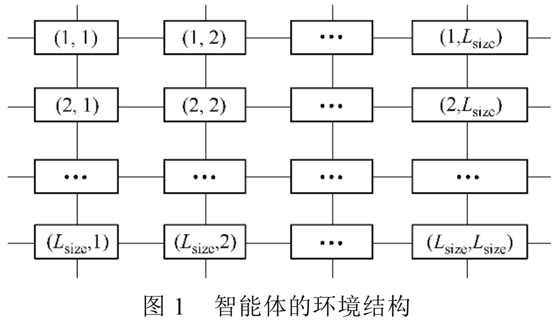

图 1　智能体的环境结构

Fig.1　Structure of the agent environment

能与 L_{ij} 发生相互作用的智能体为 L_{ij} 的邻域，记为 N_{ij}。对于智能体的不同行为，它的感知范围是

不同的，因而它的邻域也不同。

4.4 智能体的行为

对于配电网大面积断电问题，要求必须尽快制定供电恢复计划，即用尽可能少的计算量来求得高质量的解，所以计算量就可 看作是智能体所生存环境中的资源。智能体的行为是由最大化其能量的目的驱动的，而环境中的资源又是有限的，这就导致智能体会采取一定的行为来增大自身的能量，包括竞争行为与自学习行为。

4.4.1 竞争行为

对于竞争行为，每个智能体的感知范围恒为1，此时的邻域称为竞争邻域，记为 N^{c}。对于智能体 L_{ij}，它将与其竞争邻域比较能量。若它的能量不小于其竞争邻域中任一智能体的能量，则可以生存下去；否则它将死亡，而它的位置由其竞争邻域中能量最大的智能体的子代所代替。产生子代有两种方式：第一种方式同时利用 L_{ij} 与 $a_{\max}$ 的信息来产生子代，它随机抽取一些 L_{ij} 与 $a_{\max}$ 不同的位来修改 $a_{\max}$ 所对应的位；第二种方式则采用遗传算法中常用的按位变异[20]。

4.4.2 自学习行为

对于自学习行为，每个智能体的感知范围记为 R_{s}，此时的邻域称为竞争邻域，记为 N^{t}。只有当某个智能体的能量不小于其自学习邻域中任一智能体的能量时，它才能获得一次自学习的机会 [21]，以增大自身的能量。

4.5 不可行解的修复

智能体采用二进制编码，在其竞争行为及自学习行为过程中会产生大量不可行解，使得算法的搜索效率降低。配电网重构中不可行解通常有两种情况：解对应的拓扑结构中存在 “闭环”；解对应的拓扑结构中存在至少一个不和电源节点相连通的“孤岛”。在已有基于遗传算法的配电网络重构方法中，在网络重构前后，断开的开关总数不变，一般不能支持存在甩负荷情况下的网络重构。配电网大面积断电供电恢复情况往往为了满足安全运行的需要必须甩去一部分负荷，因此网络重构后分段的开关大于网络重构前。本文提出改进的基于环路分解的策略，在算法过程中能够有效地消除闭环及孤岛。

一个配电网的网架结构可确定其对应的所有环路[16]，环路有两种形式：从配电网的一个电源点出发，每个节点只经过一次，到达另一个电源点的环，称这种环为第一类环；从配电网的某个节点出发，每个节点只经过一次，又回到这个节点的环，称这种环为第二类环。定义广义环路的概念，广义环路是指环路上至少有一个参与编码的节点断开的环路。首先判断当一个配电网广义环路个数不等于该配电网的环路个数时，必然存在闭环。此时，随机选择打开相应的闭环回路中的一个开关即可消除闭环。然后逐个检测所有的第一类环路，若某个环路中存在孤岛则检查所有包含相应节点的第一类环路中是否存在相同的孤岛，是则代表解为包含孤岛的不可行解，将孤岛位置 0 或将孤岛与电源间开关全部置 1（两种方式随机选取）。在消除闭环过程中可能会形成新的孤岛，因此应先检测清 除闭环，然后检测清除孤岛。

4.6 算法具体实现

（1）故障发生后，处于断电区域的 DG 解列为单元孤岛或多用户孤岛运行。

（2）确定断电区域以及智能体二进制编码对应的支路顺序，确定初始种群规模（$L_{\text{size}}\times L_{\text{size}}$）、竞争邻域 N^{c}、自学习邻域 N^{t}、最大迭代次数 N 等。

（3）产生初始种群，即 $L_{\text{size}}\times L_{\text{size}}$ 个智能体。

（4）计算智能体的能量。按照式（1）的目标函数计算每个智能体的能量。

（5）对智能体网格中的每个智能体在其竞争邻域采用竞争行为。若 $\forall \boldsymbol{a}\in N_{ij}^{c}$，$Energy(\boldsymbol{a})\leqslant Energy(L_{ij})$，则 L_{ij} 保持不变；否则根据参数 D^{h} 确定一种竞争方式产生一个新智能体。

（6）不可行解修复及计算智能体的能量。

（7）对智能体网格中的每个智能体在其竞争邻域采用竞争行为及自学习行为。

（8）不可行解修复及计算智能体的能量。

（9）终止条件判断。判断进化代数是否到达设定值 N，若是，智能体网格中能量最大的智能体即为最优解；否则转（5）。

（10）对于处在供电恢复范围的孤岛，进行同期操作，再次并网。否则孤岛继续独立运行。

5 实例

图 7 为一典型的实际配电网 [22]，包含 85 个节点，15 条馈线，5 条变电站母线，7 个分布式电源。括号内为馈线段上的负荷大小，单位为 A，负荷进行编号标识在负荷大小旁边，实心圆代表合闸，空

心圆代表分闸。每条馈线的容量为 400A，每个分布式电源容量为 100A，系统总负荷为 3.449kA。设定智能体网格的规模为 6×6 的环形网络，竞争邻域 N^{c}、自学习邻域 N^{t} 均为 1，最大迭代次数 N 为 100。假设母线 E 发生故障，断路器 Q_9、Q_{10}、Q_{11}、Q_{12}、Q_{13}、Q_{14}、Q_{15} 断开以隔离母线 E，由剩余 8 条馈线将尽可能多的失电负荷恢复供电。DG_1、DG_3 及 DG_4 均处于断电区域中，故障发生后 DG_1 解列为孤岛 A，以单元孤岛形式独立运行；DG_3 及 DG_4 若以多用户孤岛形式独立运行，则区域内负荷超出了 DG_3 及 DG_4 的容量之和，因此 DG_3 及 DG_4 直接解列成单元孤岛 C 及单元孤岛 D 独立运行。

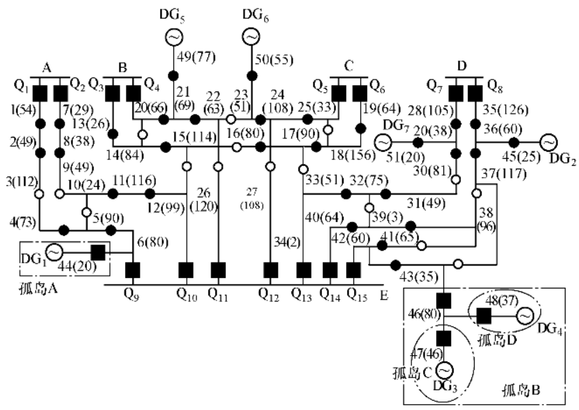

图 2　包含 DG 配电网恢复实例

Fig.2　Sample of the distribution restoration with DG

将本文算法连续运行 50 次优化计算，最后得到优化结果见表 1，恢复断电负荷 1070A，需甩负荷 6、42。供电恢复后，由于孤岛 A 仍处于断电区域中，继续孤岛运行；孤岛 C 与孤岛 D 周边负荷均恢复供电，则并网运行。与此配电网中不配置分布式电源情况比较，仍利用本文提出的算法进行计算，则只能恢复负荷 826A，需甩负荷 6、40、41、42、46。由此可见，利用本文提出的 DG 在故障恢复过程中的分层孤岛运行方式，能有效 地减少停电区域，提高系统供电可靠性。

表 1　实例优化计算结果

Tab.1　The optimization results of the sample

断路器	加载负荷	断路器	加载负荷
Q_1	1,2,3,4,5	Q_5	23,24,25,27
Q_2	7,8,9,10,11,12	Q_6	17,18,19,33,34
Q_3	13,14,15,16	Q_7	28,29,30,31,32,39,40
Q_4	20,21,22,26	Q_8	35,36,37,38,41,43,46

本文按文献[23]提出的改进混 合遗传算法编制优化程序并连续运行 50 次，最后得到的优化结果与本文提出算法相同，迭代次数比较见表 2。

表 2　进化统计

Tab.2　Evolution statistic

比较项目	文献[23]方法	本文方法
得到全局最优结果的最小进化代数	37	8
得到全局最优结果的最大进化代数	210	76
得到全局最优结果的平均进化代数	136.3	34.8

利用本文算法得到最佳结果时，进化超过 50 代的有 5 次，90%的在 50 代以内得到最佳结果，由此可见本文算法有着较快的收敛速度和较高的计算效率。

图 3 是多智能体遗传算法取不同 L_{size} 值时所对应的恢复断电负荷。在多智能体遗传算法中，$L_{size}\times L_{size}$ 相当于遗传算法中的初始种群数。从图中可知，本文提出的算法只需较少的种群数就可以获得最优解。当 L_{size} 取值为 4 时由于种群规模较小，算法求得恢复负荷 990A，并未搜索到全局最优解；当 L_{size} 取值为 5～10 时，搜索结果均为恢复负荷 1070A，算法均能成功搜索到最优解； 而遗传算法通常的种群数在 60～80 个左右才能取得较好的效果，并且种群数影响其解的质量。可见本文算法具有良好的收敛稳定性。

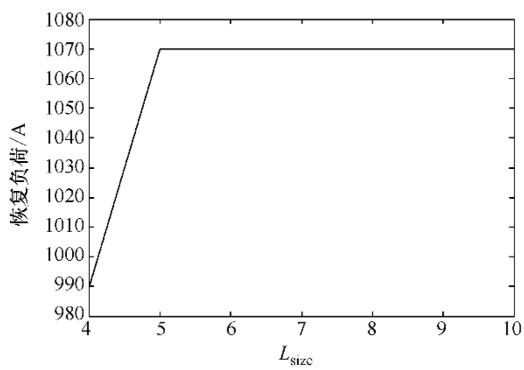

图 3　不同 L_{size} 值的优化结果比较

Fig.3　Comparison of optimal results for different L_{size}

6　结论

本文提出了采用多智能体遗传算法解决包含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复问题。提出了分布式电源在故障恢复过程中的分层孤岛运行方式，能够有效减少停电区域。多智能体遗传算法通过设计智能体的竞争行为和自学习行为来增加目标函数值以寻求最优解，能够充分利用智能体的智能实现全局收敛和快速的收敛速度。在智能体竞争及

自学习行为过程中采用改进的基于环路分解的方法消除不可行解，提高搜索效率。算例结果表明，文中所提方法能有效地求解考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复问题。

单元孤岛运行或多用户孤岛运行需要进行预先规划，对孤岛内的控制措施和保护也有特殊的要求，同是意味着复杂的运行方式和额外的投资，如何解决上述问题还有待深入研究。

参考文献

[1] Luan W P, Irving M R, Daniel J S．Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145-151.

[2] Zhu J Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm[J]. Electric Power System Research, 2002, 62(1): 37-42.

[3] 余健明，蔡利敏，杨文宇．基于提高系统可靠性降低网损的配电网络重构 [J]. 电工技术学报， 2004, 19(10): 70-73.
Yu Jianming, Cai Limin, Yang Wenyu. Distribution network reconfiguration for system reliability improvement and power loss reduction[J]. Transac- tions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 70-73.

[4] 李海锋，张尧，钱国基，等．配电网故障恢复重构算法研究[J]．电力系统自动化 , 2001, 25(16): 34-37.
Li Haifeng, Zhang Yao, Qian Guoji, et a1. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 34-37.

[5] 葛朝强，唐国庆，王磊．综合智能式的故障恢复专家系统与故障恢复算法集相结合的自学习模糊专家系统[J]．电力系统自动化 , 2000, 24(2): 17-21.
Ge Zhaoqiang, Tang Guoqing, Wang Lei. Integrated intelligent service restoration system for distribution network——an auto-learning fuzzy expert system combined with service restoration algorithm set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 17-21.

[6] 刘健，武晓朦，余健明．考虑负荷不确定性和相关性的配电网络重构 [J]．电工技术学报 , 2006, 21(12): 54-59.
Liu Jian, Wu Xiaomeng, Yu Jianming. Distribution network reconfiguration considering load uncertainty and dependence[J]. Transactions of China Electro- technical Society, 2006, 21(12): 54-59.

[7] 沈广，陈允平，刘栋，等．基于最小生成树编码的配电网恢复遗传算法 [J]. 电力系统自动化， 2007, 31(14): 81-84.
Shen Guang, Chen Yunping, Liu Dong, et a1. Distribution network restoration based on the genetic algorithm with minimum spanning tree decoding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 81-84.

[8] 刘健，徐精求．紧急状态下配电网断电快速恢复算法[J]．中国电机工程学报 , 2004, 24(12): 132-138.
Liu Jian, Xu Jingqiu. Algorithms on fast restoration of large area breakdown of emergency states[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132-138.

[9] 刘栋，陈允平，沈广，等．基于 CSP 的配电网大面积断电供电恢复模型和算法 [J]. 电力系统自动化 , 2006, 30(10): 28-32.
Liu Dong, Chen Yunping, Shen Guang, et a1. CSP－based model and algorithm of service restoration for large area blackout of distribution system[J]. Auto- mation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 28-32.

[10] Mcdermott T E, Dugan R C. PQ, reliability and DG[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 9(5): 17-23.

[11] Pilo F, Celli G, Mocci S. Improvement of reliability in active networks with intentional islanding[C]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004.

[12] Zeineldin H H, Bhattacharya K, El-saadany E F, et al. Impact of intentional islanding of distributed generation on electricity market prices[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 147-154.

[13] 卢志刚，董玉香．含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]．电力系统自动化 , 2007, 31(1): 89-92.
Lu Zhigang, Dong Yuxiang. Service restoration strategy for distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1):

89-92.

[14] 易新，陆于平．分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]．电网技术, 2006, 30(7): 50-54.
Yi Xin, Lu Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54.

[15] Yu Xiaodan, Jia Hongjie, Wang Chengshan, et al. Network reconfiguration for distribution system with micro-grids[C]. The 1st SUPERGEN Conference, Nanjing, China, 2009.

[16] 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.

[17] Bollen M H, Sun Y, Auh G W. Reliability of distribution networks with DER including intentional islanding[C]. International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005.

[18] 刘淑萍，韩正庆，高仕斌．基于多 Agent 的配电网故障处理方案的研究 [J]．继电器, 2006, 32(22): 39-42.
Liu Shuping, Han Zhengqing, Gao Shibin. Study on a scheme of fault disposing for distribution network based on MAS[J]. Relay, 2006, 32(22): 39-42.

[19] 和敬涵，朱光磊，薄志谦．基于多 Agent 技术的电力系统集成保护 [J]．电工技术学报，2007, 22(6): 141-147.
He Jinghan, Zhu Guanglei, Bo Zhiqian. Integrated protection for power systems based on the multi-agent technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 141-147.

[20] 李敏强．遗传算法的基本理论与应用 [M]．北京：科学出版社, 2002.

[21] 钟伟才，刘静，刘芳，等．组合优化多智能体进化算法[J]．计算机学报, 2004, 27(10): 1341-1353.
Zhong Weicai, Liu Jing, Liu Fang, et a1. Combinatorial optimization using multi-agent evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(10): 1341-1353.

[22] 刘健，石晓军，程红丽，等．配电网大面积断电供电恢复及开关操作顺序生成 [J]．电力系统自动化, 2008, 32(2): 76-79.
Liu Jian, Shi Xiaojun, Cheng Hongli, et a1. Restoration for large area blackout of distribution network and switching operation sequence management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 76-79.

[23] 郑欣，杨丽徙，谢志棠．配电网络重构的改进混合遗传算法[J]．继电器, 2004, 32(5): 11-14.
Zheng Xin, Yang Lixi, Tse C T. A refined hybrid genetic algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Relay, 2004, 32(5): 11-14.

作者简介：徐玉琴　女，1964 年生，教授，主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统继电保护等。张丽　女，1983 年生，博士研究生，研究方向为包含分布式电源的配电网供电恢复及控制。