有源配电网的综合供电恢复及改进遗传算法

李振坤[1]，刘 俊[2]，杨 帆[2]，楼越焕[1]，时姗姗[2]

（1.上海电力学院，上海 200090；2.国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437）

摘要：随着分布式电源在配电网中渗透率的提高，利用 DG 的孤岛运行能力为故障后配电网中非故障区域的停电负荷恢复供电，可有效提高配电网的供电可靠性。在考虑功率平衡、DG 孤岛个数和配电网内联络开关的影响因素下，对有源配电网的恢复供电进行了研究。通过将备用联络线路等值为 DG，在恢复决策过程中同时考虑 DG 与联络开关，提高了整体方案的优越性。在利用 DG 对负荷恢复供电的过程中，充分考虑了 DG 的类型及控制特性，通过将 DG 分为主电源和从电源，研究了主从控制模式下孤岛供电的恢复方案。在孤岛划分过程中，采用改进遗传算法进行了求解，结合有源配电网的网络结构以及故障后孤岛的主从控制模式，提出了染色体编码时的两大约束条件以及基因组与基因子块的概念，染色体间的交叉和变异操作全部基于基因组进行操作，有效避免了无效解的产生。最后对一包含 3 条馈线、7 台 DG 的配电网进行了仿真研究，验证了所提方法的有效性。

关键词：有源配电网；分布式电源；供电恢复；孤岛划分；主从控制；改进遗传算法

Restoration of distribution network containing DG and a refined genetic algorithm

LI Zhen-kun[1], LIU Jun[2], YANG Fan[2], LOU Yue-huan[1], SHI Shan-shan[2]

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Electric Power Research Institute of Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: With the development of DG, using its islanding operation ability to restore power supply after fault can effectively improve the reliability of power supply distribution network. In this paper, the power balance, number of islands and the effect of tie switch are all considered, and the comprehensive restoration of active distribution network is researched. Through the DG equivalence of standby contact line, DG and contact switch and all considered in the decision-making process in recovery, so the overall scheme superiority is improved. In the process of load restoration using DG, the type and control characteristic of DG are fully considered, and based on master-slave control mode the DG islands is divided, finally the load of each island is selected by the maximum load power circle algorithm. An improved genetic algorithm is used to solve the islanding problem, combined with the network structure of active distribution network and the master-slave control mode, two major constraints are put forward, and the concept of genomic and gene block is proposed. The crossover and mutation operation of GA are both based on genome, which effectively avoids the invalid solution. Finally, a simulation study is performed on a distribution network consists of 3 line, 7 sets of DG, and the results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network containing DG; distributed generator; power supply restoration; island dividing; master-slave control; improved genetic algorithm

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)17-0024-07

0 引言

配电网故障后供电恢复是智能配电网的核心功能，是实现配电网自愈的重要保证，对满足用户供电需求及提高供电可靠性具有十分重要的意义[1]。分布式电源（Distributed Generation，DG）融入配电网后，如何充分利用 DG 的发电能力，快速地且最大化地恢复负荷供电，具有重要的研究意义。

传统的配电网供电恢复是基于配电网络的冗余设计，利用备用联络线路快速恢复停电区域的供电，该问题的研究相对已较为成熟，主要基于数学运筹优化方法[2]、启发式搜索方法[3]、人工智能算

基金项目：国家电网公司科技项目(H2013-042)

法[4]及图论的相关理论优化制定恢复方案。随着 DG 技术的成熟与良好的发展前景，基于 DG 的孤岛运行能力恢复供电也得到了许多学者的重视，如文献[5]首先由 DG 的容量寻找到 DG 的最大供电范围，将其形成孤岛，然后再利用联络开关对剩余负荷恢复供电。文献[6]是考虑孤岛的功率平衡，以 DG 为中心按照负荷的优先等级由高到低依次向电源周围负荷供电的有效算法，得到孤岛供电方案。文献[7]基于二进制粒子群优化算法对未恢复的停电区域进行恢复。文献[8]基于图论中的树背包问题，建立了基于二进制编码和分支定界的算法，提出以“搜索+调整”的两步解决策略。文献[9]假设所有负荷都是可控的，初始孤岛是连接各个 DG 和重要负荷的网络，根据负荷守恒来削减调整负荷，该策略只能形成一个孤岛，所有的 DG 只能在一起工作。文献[10]提出供电恢复的算法，先用着色算法标明非故障断电区域，然后使用最短路径得到负荷的最优供电路径，用核心算法生成核心模式染色体，接着用遗传算法寻优。文献[11]运用遗传算法对供电恢复问题进行了研究，并将遗传算法中的每条染色体视为一智能体，与其邻域内的其他个体展开竞争操作与自学习行为，使得该算法具有较好的全局搜索能力和收敛速度。综上所述，目前有源配电网的恢复供电决策已取得一定的成果，但诸多研究对 DG 进行了简化，例如笼统假设所有 DG 都具有孤岛运行能力，或没有依据 DG 的不同类型及控制方式分别考虑，更没有充分考虑孤岛的控制方式，如主从控制或对等控制等，使得恢复方案难以切实可行。

本文整体考虑了联络开关和各种 DG 资源，对有源配电网的供电恢复进行了综合决策，在决策过程中将备用联络线路进行了 DG 等值，并对配电网内融入的真实 DG 进行了分类处理，将具有频率和电压调节能力采用 VF 控制方式的 DG 定义为主电源，将随机不可控的电源定义为普通 DG，然后基于主从控制的孤岛运行模式，对配电网的广义孤岛划分及恢复供电进行了研究。在运用遗传算法对该问题进行求解的过程中，基因编码充分结合有源配电网的物理特点，需要搜索的解空间大大减少，且在该基础上的交叉和变异操作不会产生不可行解，有效提高了计算速度，可完全满足实时恢复供电决策的需求。

1　有源配电网供电恢复的数学模型

有源配电网供电恢复决策的优化目标 F 为最大化的恢复停电负荷，约束条件主要有功率平衡约束、节点电压约束、支路功率约束、DG 的出力限制约束以及可行的网络结构约束等。具体数学模型如下。

$$\max\ F=\sum_{i\in Z}x_iP_i \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i\in Z_k}S_{\mathrm{G}\min i}\le\sum_{j\in Z_k}S_{\mathrm{L}j}\le\sum_{i\in Z_k}S_{\mathrm{G}\max i} \tag{2}$$

$$U_{\mathrm{L}i}\le U_i\le U_{\mathrm{U}i} \tag{3}$$

$$S_i\le S_{\max i} \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{G}\min i}\le S_{\mathrm{G}i}\le S_{\mathrm{G}\max i} \tag{5}$$

$$g_i\in G \tag{6}$$

其中：Z 为停电区域；P_i 表示第 i 个停电负荷的有功功率；x_i 为 0-1 变量，表示第 i 个停电负荷是否恢复供电，0 表示没有恢复供电，1 表示恢复供电；公式（2）为孤岛的功率平衡约束，Z_k 为孤岛范围，该孤岛内负荷的功率之和需满足该孤岛内 DG 的出力的上下限范围；U_i、$U_{\mathrm{U}i}$、$U_{\mathrm{L}i}$ 分别为节点 i 的电压水平及其上下限；S_i 和 $S_{i\max}$ 为支路 i 流过的功率值和最大容许值；$S_{\mathrm{G}i}$、$S_{\mathrm{G}i\max}$、$S_{\mathrm{G}i\min}$ 为第 i 个分布式电源输出的实际功率及其可输出功率的最大值和最小值；g_i 为供电恢复后的网络结构；G 为所允许的网络结构，除了辐射状约束外，由于本文采用主从控制模式，因此，还要求孤岛内有且仅有 1 个主电源。

2　DG 分类及联络线路的 DG 等值

2.1 孤岛内部 DG 分类

孤岛运行配电网的控制方式主要有两种：主从控制(master-slave control)和对等控制(peer-to-peer control)[12-14]。主从控制是目前实际孤岛运行电网采用的主要方式。在主从控制中各 DG 控制方式不同，在孤岛运行电网中担任不同的职能，其中有一个作为主电源，使孤岛电网的电压和频率稳定在额定值，其他从电源根据主电源提供的电压和频率输出一定的有功和无功功率。采取主从控制模式的孤岛电网中 DG 的单体控制模式主要由以下两种：V/F、PQ 模式，采用 V/F 控制的作用在于稳定的电压和频率的输出，因此这种运行模式适用于主电源 DG，建立孤岛运行的电压和频率[15]。采用 PQ 控制策略的 DG，只需要跟随主电源发出有功和无功功率，系统已经提供了现成的电压幅值和相位，因此这种模式适用于从电源。依据上述定义和分类，主电源 DG 一般有储能、柴油机、燃料电池等，可以独立运行，具有电压和频率的调节能力。普通 DG 不能孤岛独

立运行，需借助外界提供的参考电压和频率跟随运行，如风力发电、光伏发电、小水电等随机的不可控 DG。

鉴于主从控制较为成熟，本文在独立运行配电网采用主从控制的假设下对孤岛进行划分。

2.2 备用联络线路的 DG 等值(图 1)

DG 融入配电网后，需要综合考虑备用线路和 DG 这两类资源，进行全局综合优化，最大化的恢复停电负荷。备用线路具有一定的备用容量，且提供了外网的电压和频率，假设备用线路容量为 S，可将其等效为输出容量在 $[-S,S]$ 区间内的 V/F 控制模式下的 DG，且该 DG 可建立稳定的电压和频率，其最大输出功率为 S，最小输出功率为 $-S$。联络线路在等值后的虚拟 DG 应视为主电源 DG，具有独立运行的能力。

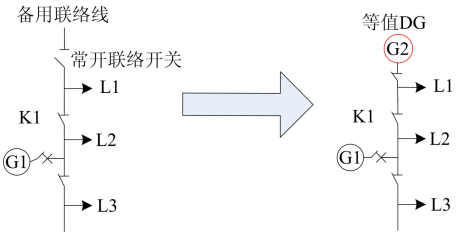

图 1　备用联络线路的 DG 等值

Fig. 1 Reserve tie-line equivalence to DG

将停电区域内的所有备用线路均作上述 DG 等值后，非故障失电区域的 DG 和联络线路都将统一为 DG，基于备用线路和 DG 的供电恢复综合优化问题，简化为完全基于 DG 的供电恢复决策，有利于后续算法模型的建立。

3　改进遗传算法在恢复供电的应用

本文首先对备用线路进行 DG 等值，将有源配电网的综合恢复供电问题，简化为完全基于 DG 的恢复供电决策，然后基于配电网内主电源的数量，采用改进遗传算法优化划分各孤岛范围，对有源配电网进行综合恢复供电决策。具体算法如下。

(1) 染色体编码策略

对配电网故障后恢复供电和孤岛划分的研究，是在考虑线路的备用容量及 DG 的孤岛运行能力的条件下，寻求配电网所有开关的最优开断组合。本文采用常规二进制编码方式，每个开关占染色体的一位，其中染色体长度为开关数目，0 表示分闸，1 表示合闸。这种编码方法简洁、易于实现，且满足 De Jong 提出的编码原理[16]。

(2) 染色体约束条件

为了便于约束条件的阐述，本文首先定义了染色体中基因组和基因子块两个概念。

基因组：配电网内相邻的两个或两个以上主电源之间的开关。如图 6 为后文仿真算例忽略从电源后的的简化图，图中四个分布式电源（燃气轮机、柴油机、储能设备和 G8）均为主电源，则燃气轮机与柴油机之间的开关为一基因组，该基因组由开关 2-6 组成；柴油机、储能电源和 G8 这三个电源之间的开关为另一基因组，由开关 7-14 组成。基因组是后文遗传操作中交叉和变异的基本单元。

基因子块：基因组内任意两个主电源之间的开关构成一个基因子块。如上述基因组 A（开关 2-6 组成）只与两个主电源相连，即燃料电池和柴油机，则该基因组内就只有 1 个基因子块，而基因组 B（开关 7-14 组成）与三个主电源相连，则该基因组内有 3 个基因子块，即柴油机与 G8 之间的开关 7-12 为一基因子块，柴油机与储能电池间开关 7-9、13、14 为一基因子块，G8 与储能间开关 10-14 构成第三个基因子块。

在主从控制下，每个孤岛内只能存在一个主电源，为了确保孤岛内各个主电源相互独立，没有电气联系，避免不可行解的产生，针对染色体特制订以下两个约束条件。

1）若某一基因组与 N 个主电源相连，则该基因组内有 N-1 个基因为 0，其他基因为 1；该条件限制了基因组内开关的断开个数，避免了大量不可行解，且与条件（2）结合，避免了孤岛内仅有负荷与普通 DG 的情形，确保每一孤岛内均有主电源存在。

2）基因组内的任一基因子块中至少有 1 个基因的值为 0；该约束条件确保了任意两个主电源之间均是有开关断开的，使得主从控制模式切实可行。

初始种群生成以后，对各染色体进行解析，根据断开的开关位置，初步确定各孤岛的范围。

(3) 基于功率圆优化选择孤岛内负荷，计算适应度值。

各孤岛范围初步确定后，本文采用广度优先搜索来确定每个方案中各孤岛最大功率圆的范围，选择该孤岛内可恢复的负荷，并以此来计算每一个方案的适应度值。具体操作如下：以 DG 所在点为圆心，沿着网络拓扑方向，以 DG 的最大容量为半径搜索负荷，该圆内包含的负荷点集合称为功率圆[7]。功率圆内的负荷即为可恢复的负荷，将各个孤岛可恢复负荷值相加，即得到该方案的适应度值。

(4) 选择操作

本文采用轮盘赌法进行选择操作，该方法思想简单且易于实现。各个个体被选中的概率与其适应度大小成正比。设群体大小为 N，个体 i 的适应度为 F_i，则个体 i 被选中操作的概率 P_i 为

$$P_i = F_i / \sum_{i=1}^{N} F_i \tag{7}$$

(5) 交叉操作

如果采用传统的单点交叉，就会破坏个体中基因组和基因子块的约束条件，产生不可行解，因此新策略下的染色体交叉操作以基因组作为交叉操作的基本单元，采用对应基因组交叉的方式。在交叉操作过程中随机选择某一基因组进行交叉。如图 2 中所示，两个箭头之间的基因为 1 个基因组，左侧为交叉前的两个染色体，右侧为交叉后的染色体。

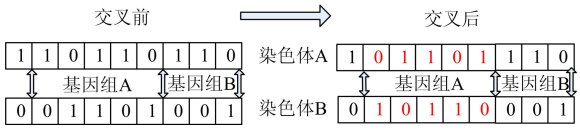

图 2 交叉示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross

(6) 变异操作

对染色体的变异操作也是基于基因组进行操作的，基于变异概率决定对某染色体进行变异操作后，随机选择某一基因组，若该基因组内 0 的个数为 m，则随机选取该基因组内 m 位并置之为 0，其他位置 1。然后进行基因子块约束条件检验，若满足要求，变异结束；否则重新选择 m 位置 0，直到基因子块的约束条件满足为止。这种变异操作确保了基因组内 0 的个数不变，使得变异后的基因组与基因子块始终满足上述的约束条件。图 3 为某一基因组变异操作示意图。

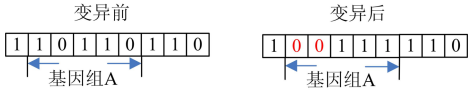

图 3 变异示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mutation

(7) 改进遗传算法流程图(图 4)

4 算例仿真分析

为了验证所提模型及算法的可行性，对图 5 所示的配电网络故障后的恢复供电进行了仿真分析，其中 10 kV 馈线由 110 kV 降压变电站供电，馈线 1 为多分段多联络的 10 kV 架空配电线路，馈线 2 和

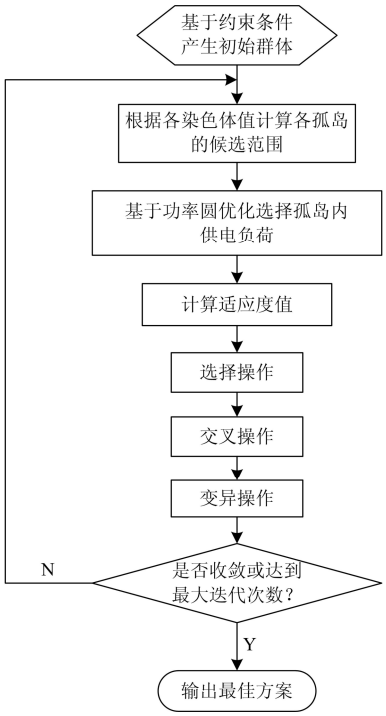

图 4 改进遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of improved GA algorithm

馈线 3 为电缆单环网。该系统中共有 2 个常开的备用联络开关、15 个分段开关，分布式电源 7 台，其中储能电站、燃料电池和柴油发电机各 1 台，均具有独立的电压和频率的调节能力，剩余 4 台 DG 为不可控的随机电源，其中风机电站和光伏电站各 2 座，负荷共有 18 个，故障时各节点负荷大小如表 1 所示，共计 10.74 MW。可控 DG 出力范围以及不可控 DG 故障时的输出功率分别如表 2、表 3 所示。

遗传算法的初始种群规模为 30，交叉率为 0.7，变异率为 0.2，最大迭代次数为 50。

表 1 各节点负荷功率

Table 1 Load capacity of the distribution system

负荷编号	负荷容量/MW	负荷编号	负荷容量/MW
L1	0.24	L10	0.69
L2	0.69	L11	0.26
L3	0.81	L12	0.39
L4	0.37	L13	0.51
L5	0.59	L14	0.66
L6	0.48	L15	0.77
L7	0.94	L16	0.92
L8	0.68	L17	0.80
L9	0.13	L18	0.81

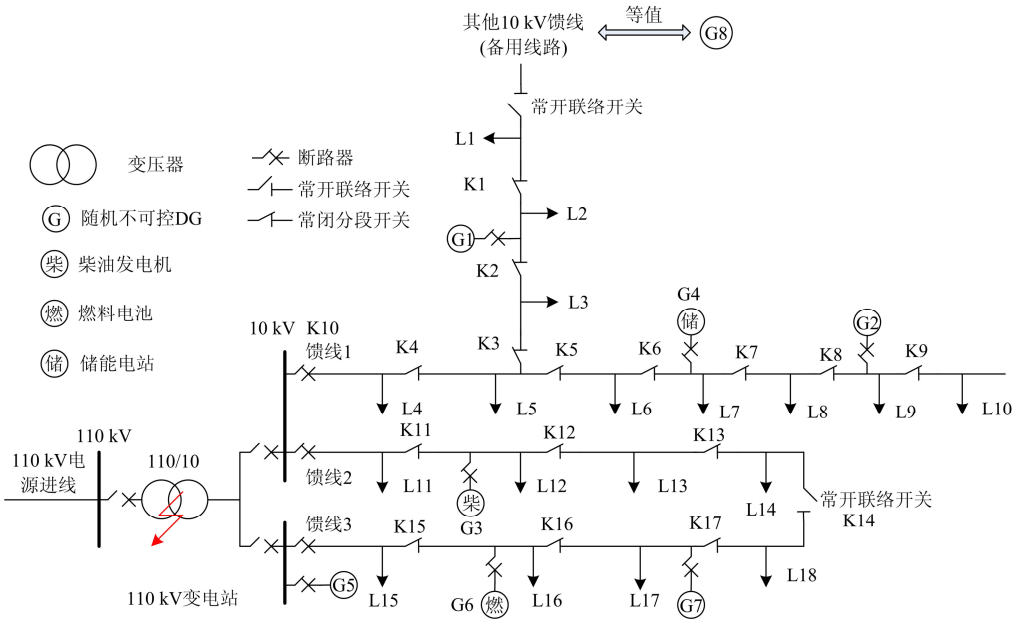

图 5　含 DG 的配电系统

Fig. 5 Distribution system containing DG

表 2　可控 DG 容量

Table 2 Controllable DG capacity

DG 编号	电源类型	最小功率/MW	最大功率/MW
DG3	柴油机	0	3
DG4	储能电站	−3.6	3.6
DG6	燃料电池	0	3
DG8	联络线路的等值 DG	−2	2

表 3　随机不可控 DG 的输出功率

Table 3 Uncontrollable DG capacity

DG 编号	电源类型	输出功率/MW
DG1	风力发电	1.58
DG2	光伏	0.84
DG5	光伏	1.38
DG7	风力发电	1.08

假设变电站发生故障，变压器保护动作，下游 10 kV 馈线失去供电，需要进行供电恢复决策，使得停电负荷通过备用联络线路和电网中融入的 DG 恢复供电。从表 2 可以看出，将备用联络线路等值为 DG 后，该系统中共有 4 个主电源，即 DG3、DG4、DG6、DG8，因此，停电区域可围绕这 4 个主电源划分为 4 个独立运行的区域。图 6 为忽略从电源后的简化网络，由该图可知，配电网有两个基因组，燃料电池和柴油机为一个基因组 A；柴油机、等价电源和储能电站构成另一个基因组 B。由于该网络中共有 17 个开关，因此，每个染色体包含 17 位二进制数。

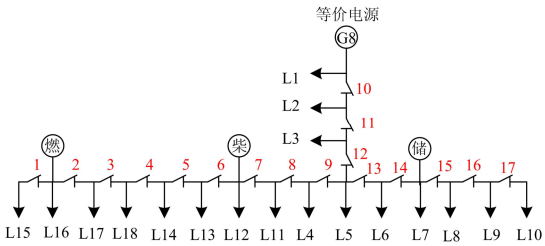

图 6　主网络简化图

Fig. 6 Simplified diagram of the main network

基于前文所述算法，在 Matlab 环境下进行仿真计算，迭代过程中的收敛曲线如图 7 所示，迭代 3 次左右即可达到最优值。

得到的最优方案中各孤岛的范围及所包含的

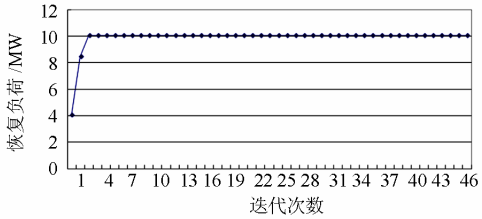

图 7　迭代过程的最佳适应度值

Fig. 7 Best fitness value

DG 与负荷如表 4 所示，其中孤岛 C 包含了备用联络线路所等值的虚拟分布式电源 DG8，实际为通过备用联络开关并网恢复供电，恢复负荷 1.74 MW，孤岛 A、孤岛 B 和孤岛 D 则为真实的孤岛，恢复的负荷量分别为 2.49 MW、2.63 MW 和 3.19 MW。可见，基于分布式电源的孤岛运行可有效提高电网的供电可靠性，并可在一定程度上减少备用联络线路的容量，提高设备利用率，降低电网建设投资。

表 4 最终供电恢复方案

Table 4 Final restoration results of islands

孤岛	孤岛范围（DG 及负荷）	主电源	孤岛负荷 /MW
A	DG6、DG7、DG5、L15~L17	燃料电池	2.49
B	DG3、L11~L14、L18	柴油机	2.63
C	DG8、DG1、L1~L3	备用联络线路	1.74
D	DG4、DG2、L4~L9	储能电站	3.19

另外由图 7 可知，当迭代次数为 3 次时，最佳适应值就达到了最大值。因为本文算例的结构较小，开关数目相对较少，且经过两大约束筛选后，去除了不可行解，因此，在给定的种群规模下，仅仅经过三次迭代就可以达到最大值，由此看出 GA 算法的收敛速度大大加快，改进遗传算法针对有源配电网恢复供电决策具有较好的可行性。

5　结语

充分利用配电网中备用联络线路和融入的 DG 给停电负荷恢复供电，可有效地提高配电网供电的可靠性。本文将 DG 按其类型及控制方式进行了分类处理，在孤岛的主从控制模式下制定了配电网故障后的供电恢复方案，并通过将备用联络线路等值为 DG，有效简化了该综合优化问题的复杂性。基于配电网供电恢复的物理问题下，提出了改进遗传算法中染色体取值的两大约束条件，避免了不可行解的产生。从仿真结果看出，改进的遗传算法针对有源配电网的供电恢复决策问题可快速找到最优解，具有较高的实用价值。

参考文献

[1] SONG I K, JUNG W W, KIM J Y, et al. Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 367-374.

[2] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.

[3] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 65-69.
MA Xiu-fan, ZHANG Li-zi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 65-69.

[4] 刘蓓, 汪沨, 陈春, 等. 一种配电网故障阶段式恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 24-30.
LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. A phased fault restoration algorithm for distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 24-30.

[5] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 99-100.
LIU Jian, DONG Xin-zhou, CHEN Xing-ying, et al. Fault location and restoration for distribution systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 99-100.

[6] 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): 49-54.
YI Xin, LU Yu-ping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 49-54.

[7] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 45-49.
ZHAO Jing-jing, YANG Xiu, FU Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 45-49.

[8] 王旭东, 林济铿. 基于分支定界的含分布式发电配网孤岛划分[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 16-20.
WANG Xu-dong, LIN Ji-keng. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm[J]. Proceedings of the CSEE , 2011, 31(7): 16-20.

[9] MAO Yi-ming, MIU K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1346-1352.

[10] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 83-86.
WU Jian-zhong, YU Yi-xin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 83-86.

[11] 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.

[12] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.
GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.

[13] BORREGA M, MARROYO L, GONZALEZ R, et al. Modeling and control of a master–slave PV inverter with N-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(6): 2842-2855.

[14] 黄杏, 金新民. 微网用分布式电源变流器下垂特性控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 94-100.
HUANG Xing, JIN Xin-min. A voltage and frequency droop control method for microsources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 94-100.

[15] 张新昌, 张项安, 孔波利, 等. 微电网的多重主从控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 20-25.
ZHANG Xin-chang, ZHANG Xiang-an, KONG Bo-li, et al. Research on multiple master-slave control strategy of micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 20-25.

[16] DE JONG K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. University of Michigan, 1975.

收稿日期：2013-05-03；　　修回日期：2013-06-30

作者简介：

李振坤(1982-)，男，通信作者，博士，主要研究方向为配电网规划及其运行控制、分布式电源并网及微电网。E-mail: lzk021@163.com