

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.006

孤岛与重构相配合的配电网故障恢复策略

Fault recovery strategy for distribution network with isolated island and reconfiguration

刘星, 崔双喜

LIU Xing, CUI Shuangxi

(新疆大学 电气工程学院, 乌鲁木齐 830047)

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

摘要: 在含分布式电源的配电网故障恢复过程中, 会出现多条孤立支路和个别负荷无法恢复供电的情况。为有效解决此类问题, 首先对深度优先搜索算法进行改进, 实现对孤岛的精准划分; 然后根据破坏操作理论, 采用二进制粒子群算法在剩余配电网中寻找最佳开关组合, 实现故障重构; 最后对 IEEE33 节点系统进行算例分析并使用 Matpower 软件验证, 采用失电负荷恢复率指标来评估所提方案的恢复效果。多个算例结果的对比验证了孤岛与重构配合方案的有效性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 故障恢复; 改进深度优先搜索算法; 破坏操作; Matpower 软件; 恢复率

中图分类号: TM 727

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)01-0029-06

Abstract: In the fault recovery process of distribution network with distributed generation, power supply for some isolated circuits and loads can not be recovered. In order to solve these problems effectively, the depth-first-search algorithm should be improved to achieve the accurate partition for isolated islands. Then, according to the theory of loop-breaking operation, the binary particle swarm optimization algorithm was used to find the best switch combination in the residual distribution network, and to achieve fault reconfiguration. Finally, an case study on an IEEE33 bus system was made and validated by Matpower software. The load restoration rate was used to evaluate the recovery effect of the proposed scheme. By comparing the results of several cases, the effectiveness of the proposed scheme is verified.

Keywords: distributed generation; distribution network; fault recovery; improved depth-first-search algorithm; loop-breaking operation; Matpower software; restoration rate

0 引言

在含分布式电源配电网发生故障时, 一般分孤岛划分和剩余网络重构 2 个阶段进行恢复。两者之间的配合程度直接影响整个配电网故障的恢复效果。

许多文献只是侧重研究孤岛划分或网络重构的某一个方面, 两者有效配合的研究领域涉及并不多。文献 [1] 虽然提供了孤岛划分方案, 使用启发式规则对剩余配电网进行供电恢复, 但并未涉及二者的配合, 未对可能产生的孤立支路、负荷进行分析。文献 [2] 引入置信区间, 根据分布式电源出力的随机性, 提出序优化重构, 没有按照正常的先孤岛后重

构 2 个阶段进行恢复, 而是利用蝙蝠算法把孤岛划分嵌入网络进行整体重构得出最优解, 这样虽然能恢复, 但容易出现个别节点无法恢复供电的情况。文献 [3-10] 采用对故障点下游分布式电源 (DG) 进行孤岛划分, 剩余配电网采用智能算法进行重构的方法恢复供电, 但在两者的配合程度上仍有所欠缺。

为有效解决上述问题, 可以在孤岛划分过程中改变搜索范围, 即排除与有联络开关支路相连的节点, 确保联络开关线路连接、转供的功能, 减少孤立支路与节点, 从而实现孤岛划分和剩余配电网重构的配合。

1 孤岛划分数学模型

1.1 目标函数

目标函数表示的是在满足孤岛划分约束条件基础上, 孤岛内恢复负荷的最大加权值。

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-10-07

基金项目: 新疆大学自然科学基金资助项目 (BS160246)

$$\max f = \sum_{i=1}^N P_i W_i Y_i, \quad (1)$$

式中: f 为孤岛内恢复负荷的加权值; N 为负荷节点数; P_i 为节点 i 的有功功率; W_i 为节点 i 的等级系数, 设定一级负荷、二级负荷、三级负荷对应的等级系数分别为 10, 5, 1; Y_i 为节点 i 是否被划入孤岛, $Y_i = 1$ 表示划入, $Y_i = 0$ 表示未划入。

1.2 孤岛划分约束条件

(1) 功率约束。孤岛内的负荷功率不能超过 DG 所能提供的最大有功功率

$$\sum_{G(i) \in N} P_{G(i)} - \sum_{L(i) \in N} P_{L(i)} \geq 0, \quad (2)$$

式中: $G(i)$ 为孤岛内 DG 节点; $L(i)$ 为孤岛负荷节点; $P_{G(i)}$ 为 DG 的有功功率; $P_{L(i)}$ 为孤岛内负荷节点的有功功率; N 为孤岛内负荷个数。

(2) 节点电压约束。确保孤岛内每个节点的电压不超过节点所能承受电压的上下限

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}, \quad (3)$$

式中: U_i 为孤岛内节点 i 的电压; U_{\min} 为孤岛内节点 i 的电压下限; U_{\max} 为孤岛内节点 i 的电压上限。

(3) 支路容量约束。每条支路的功率不能超过该支路所能承载的最大功率

$$S_b \leq S_{b\max}, \quad (4)$$

式中: S_b 为孤岛内支路 b 的功率; $S_{b\max}$ 为孤岛内支路 b 的功率上限。

(4) 网络拓扑约束。孤岛内网路结构为辐射状。

1.3 改进深度优先搜索算法

深度优先搜索算法 (DFS) 是沿着树的深度, 从源节点遍历所有的末梢节点, 对树的分支尽可能深入地搜索, 具体内容如下: 从任意一顶点 v 开始, 访问该点的任意下一级相邻节点 v_1 , 再以 v_1 为起始点访问下一级相邻节点, 以此类推, 直到访问任意末端节点时此节点没有下一级邻节点为止; 然后回溯, 返回到上一级刚被访问过的节点, 访问此节点的其他下一级节点, 依次回到上一级, 以此类推, 直到所有节点都被访问到为止。

图 1 为含分布式电源配电网的局部, 假设故障发生在节点 2 左侧, 每个节点的负荷功率显示在小括号中, 单位为 MW, DG 安装在节点 1 处, 其容量为 1 MW。以 DG 为中心, 根据深度优先搜索算法, 遍历所有与 DG 相连通的节点, 搜索顺序为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 7$, 得到最初的孤岛可行域。

本文在原算法确定的搜索范围基础上进行改进, 排除与联络开关支路相连的节点, 保证联络开关

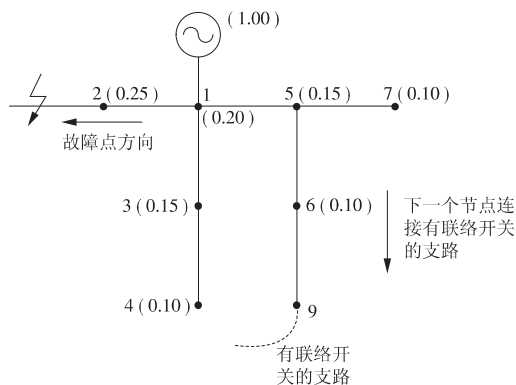


图 1 孤岛划分可行域

Fig. 1 The feasible region after island partition

在剩余配电网故障重构恢复过程中起到线路连接、转供作用, 能够有效减少孤立支路和负荷, 实现孤岛与重构的配合, 保持运行的电力网络树状结构的完整性。

孤岛划分以 DG 为源节点开始搜索, 首先排除与联络开关支路相连的节点, 然后对重要等级高的负荷支路优先供电, 紧接着对源节点到故障点之间的所有负荷进行供电, 最后根据 DG 容量情况对剩余节点供电。

第 1 步: 节点 9 是与联络开关相连的节点, 所以 6 节点下端的节点不能被划入孤岛范围。

第 2 步: 节点 1, 5, 6, 7 负荷重要等级高, 根据目标函数判断为优先供电。

第 3 步: 节点 2 是故障点方向的节点, 其左侧存在线路故障, 孤岛划分到故障点处截止。

第 4 步: DG 剩余容量对剩余的节点供电, 只满足节点 3 的负荷功率需求, 这时节点 4 不能被划入孤岛范围。

从而得到最终孤岛范围如图 2 所示, 包含负荷节点 1, 5, 6, 7, 2, 3。

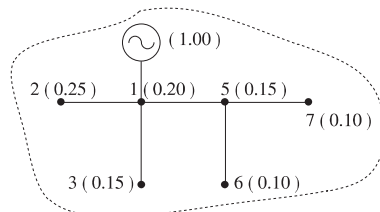


图 2 孤岛划分结果

Fig. 2 Results of island partition

2 剩余网络重构

2.1 目标函数

$$\max f = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N}, \quad (5)$$

式中: f 为故障恢复率; N 为配电网系统中除首端电

源节点外,所有负荷节点的个数; z_i 为负荷的供电状态, $z_i = 1$ 代表该负荷处于正常供电状态, $z_i = 0$ 代表该负荷处于失电状态。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) , \quad (6)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) , \quad (7)$$

式中: P_i, Q_i 分别为节点 i 末端的有功功率和无功功率; G_{ij}, B_{ij} 为支路(首末端节点分别为 i, j) 的电纳; δ_{ij} 为首末端节点 i, j 之间的电压相角差; U_i, U_j 分别为支路的首末端节点 i, j 的电压。

(2) 节点电压约束。

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max} , \quad (8)$$

式中: U_{\min}, U_{\max} 分别为节点的下限和上限电压。

(3) 支路容量约束。

$$S \leq S_{\max} , \quad (9)$$

式中: S 为支路的视在功率; S_{\max} 为支路的容量允许最大值。

(4) 网络辐射状运行约束。

$$g \in G , \quad (10)$$

式中: g 为故障恢复后新的网络拓扑; G 为满足负荷供电的辐射状全部网络拓扑结构集。

2.3 破坏操作的准备

在配电网重构中,1 种拓扑结构对应 1 个粒子,支路数对应粒子维度,每一维的值限定为 0 与 1,表示开关的断开和闭合状态。这里将二进制粒子群算法(BPSO)的适应度函数设定为配电网的网损。

配电网有 B 条支路,粒子 m 的速度用 $V = (v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mB})$ 表示,位置用 $X = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mB})$ 表示。

粒子速度和位置更新方程为

$$V_{mb}^{k+1} = \omega V_{mb}^k + c_1 r_1^k (p_{\text{best},mb}^k - X_{mb}^k) + c_2 r_2^k (g_{\text{best},mb}^k - X_{mb}^k) , \quad (11)$$

$$X_{mb}^{k+1} = X_{mb}^k + V_{mb}^{k+1} , \quad (12)$$

式中: V_{mb}^k, X_{mb}^k 分别为第 m 个粒子迭代到第 k 次时在第 b 维中的速度和位置; $p_{\text{best},mb}^k$ 为粒子群在迭代第 k 次时,第 b 维空间中粒子 m 的个体最优位置; $g_{\text{best},mb}^k$ 为粒子群迭代第 k 次时,在第 b 维空间中所有粒子群体全局最优位置; ω 为惯性权重系数; c_1, c_2 为加速因子,都为正实数; r_1^k, r_2^k 为第 k 次迭代中 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数。

将 V_{mb}^{k+1} 和 X_{mb}^{k+1} 代入 sigmoid 函数,根据式(13)产生新一代个体

$$\begin{cases} X_{mb}^{k+1} = 1, r_{mb}^{k+1} < \text{sigmoid}(V_{mb}^{k+1}) \\ X_{mb}^{k+1} = 0, r_{mb}^{k+1} \geq \text{sigmoid}(V_{mb}^{k+1}) \end{cases} , \quad (13)$$

式中: r_{mb}^{k+1} 为 $[0, 1]$ 之间的一个随机数,为了防止函数 $\text{sigmoid}(V_{mb}^{k+1})$ 饱和,这里将粒子速度设定在 $[-4, 4]$ 范围内。

$$\text{sigmoid}(V_{mb}^{k+1}) = \begin{cases} 0.982 , & V_{mb}^{k+1} > 4 \\ \frac{1}{1 + e^{-V_{mb}^{k+1}}} , & -4 \leq V_{mb}^{k+1} \leq 4 \\ -0.018 , & V_{mb}^{k+1} < -4 \end{cases} \quad (14)$$

具体步骤:(1) 输入配电网初始信息,以确定可操作开关数量和粒子的维数;(2) 设定种群规模、加速因子、最大迭代次数、粒子的维度等参数;(3) 随机初始化粒子群,获得 N 个可行解;(4) 更新每个粒子的位置和速度;(5) 通过潮流计算,获得粒子更新适应度值,即网损,同时得到对应网络 0,1 开关组合,根据拓扑结构确定恢复路径;(6) 达到最大迭代次数停止,否则返回第(4)步。

2.4 破坏操作

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{b=1}^B I_b^2 R_b , \quad (15)$$

式中: P_{loss} 为支路有功功率; B 为系统总的支路数; b 为支路编号; I_b 为流经支路 b 的电流; R_b 为支路 b 的电阻。

为阐述破坏操作理论,这里举例说明。图 3 中:①②③分别代表 3 个环路;黑点 1—14 代表节点;S1—S16 代表支路开关。假设潮流从源节点 1 开始流向节点 14。

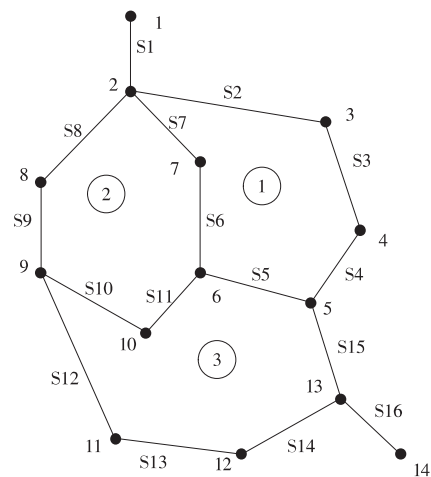


图 3 3 个环路

Fig. 3 Three loops

根据式(15)可知,网损很大程度上是由支路阻抗本身决定的,而电压、电流只不过决定网损的最终值。对存在的环路需进行一次破坏操作,以找到该环路中网损最大的单条支路,将此支路断开,同时保证网络完整的辐射状,最终得到网络网损最小的拓扑结构。

根据 BPSO,得到最佳断开支路 S3, S6, S13, 如

图 4 所示。

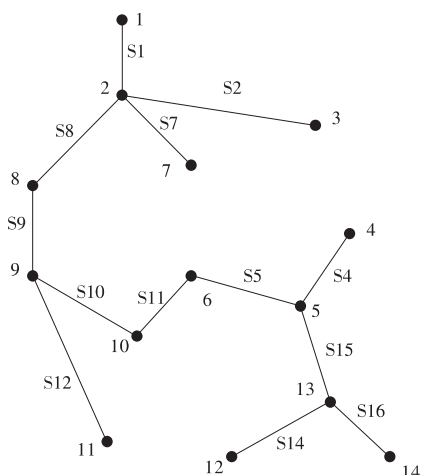


图 4 破坏操作

Fig. 4 Loop-breaking operation

使用 Matpower 可以得到图 4 的网络潮流信息(支路用首端和末端的节点表示, Matpower 中的支路排序为 1—2—3, 2—7, 2—8—9—10—6—5—4, 5—13—12, 13—14, 9—11)。输入已知母线功率、每个负荷功率及线路阻抗, 可得到网络总网损, 每个节点的电压和注入的有功功率、无功功率等信息, 用以验证由 BPSO 得到的结果和判断节点能否达到电力运行的条件。

3 算例分析

为保证算例的普适性, 采用标准的 IEEE33 节点系统(如图 5 所示)。其首端基准电压为 12.66 kV, 三相功率基准值为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 网络总负荷为 $3715 \text{ kW} + j2300 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。该系统有 33 个节点, 除节点 1 为网络电源外, 剩下的 32 个节点均为负荷节点, S1—S32 为支路分段开关, S33—S37 为支路联络开关。

假设故障点发生位置分别在 S4, S29。对于出现在电力系统可靠性评估中的孤岛, 线路的故障集中于 1 条或 2 条线路, 出现 3 条以上线路故障的概率 $< 1\%$ [11], 因此, 配电网发生线路故障这里设置 2 个是合理的。

3.1 孤岛划分

DG1 安装在 T 形节点 6 处, DG2 安装在普通节点 32 处(如图 5 所示), DG1 的容量为 850 kW, DG2 的容量为 600 kW。

DG1 容量为 850 kW, 由于节点 8 与有联络开关的支路 S33 连接, 所以排除节点 8; 节点 6, 26, 27 重要等级负荷使目标函数值最大; 节点 5 为故障点方向; DG1 剩余容量满足节点 7 负荷使用; 因此划入孤岛 1 的节点有 6, 26, 27, 5, 7。孤岛 2 中 DG2 容量为

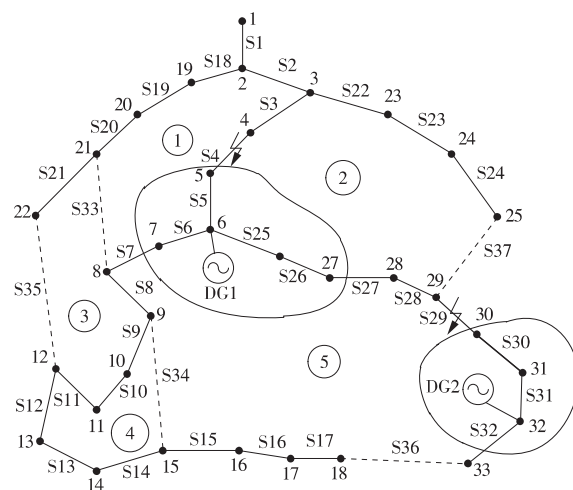


图 5 含 2 个 DG 的 IEEE33 节点配电网

Fig. 5 An IEEE33 bus distribution network with two DGs

600 kW, 供电路径节点有 32, 31, 30。

结果显示, 孤岛内负荷恢复率为 100%。

3.2 剩余网络重构

3.2.1 破坏操作

在 BPSO 中, 设置参数 $c_1 = 2, c_2 = 2$, 最大迭代次数为 80, 种群规模为 40; 配电网有 37 个开关, 对应每个粒子的维度为 37。

通过算法得到网损最小值为 139.551 kW(如图 6 所示); 同时, 用 Matpower 软件进行验证, 得到网损最小值为 140.000 kW。

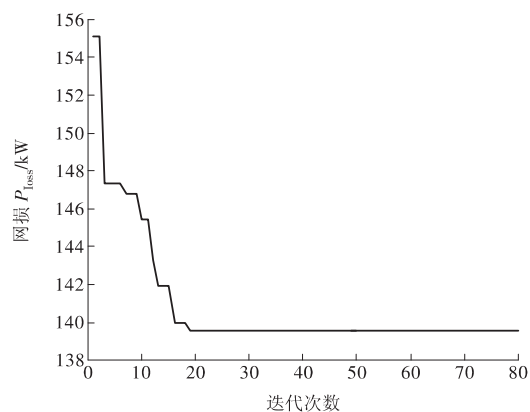


图 6 BPSO 得到的网损

Fig. 6 Network loss obtained by BPSO

此时最小网损对应的网络开关组合为 [1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0](1 表示开关闭合, 0 表示开关断开), 得到环 1—5 对应的最佳断开开关, 见表 1。

表 1 每个环所对应的最佳断开开关

Tab. 1 The best disconnect switch for each loop

| 环 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|----|-----|----|-----|-----|
| 最佳开关 | S7 | S37 | S9 | S14 | S32 |

3.2.2 剩余配电网算例 1

孤岛划分本身也具有破坏的作用。从图 5 容易

题,提出孤岛划分与网络重构相结合的方法。通过改进图论中树的深度优先搜索算法并在破坏操作中采用 BPSO 得到最佳寻优恢复路径。对 IEEE33 节点系统进行仿真分析,并与其他文献所提供的故障恢复方案进行对比,证明本文所提方案更具优越性。

参考文献:

- [1] 孙洁,王增平,王英男,等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [2] 裴文杰,汪泓,谭阳红,等. 含随机出力分布式电源配电网的序优化重构 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 29-35.
PEI Wenjie, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Distribution network reconfiguration with distributed generations characterized by output randomness based on ordinal optimization [J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2017, 29(4): 29-35.
- [3] BAE I S, KIM J O. Reliability evaluation of customers in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1416-1422.
- [4] 周渌,解慧力,郑柏林,等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合 [J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.
ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.
- [5] 冯杰,陈骏宇,陈明军,等. 基于图论的含分布式电源配电网故障恢复算法 [J]. 中国电力, 2015, 48(6): 63-71.
FENG Jie, CHEN Junyu, CHEN Mingjun, et al. Research on graph theory-based service restoration algorithm of distribution network containing distributed generation [J]. Electric Power, 2015, 48(6): 63-71.
- [6] 杨婷,赵晋泉,韩佳兵,等. 计及主网潮流响应的主动配电网故障恢复研究 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 51-56.
YANG Ting, ZHAO Jinqun, HAN Jiabing, et al. Study on service restoration for active distribution network considering power flow of main network [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 51-56.
- [7] SANCHES D S, LONDON J B A Junior, DELBEM A C B. Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 110(5): 144-153.
- [8] 张磐,唐萍,丁一,等. 考虑分布式发电波动性的有源配电网故障恢复策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 115-120.
ZHANG Pan, TANG Ping, DING Yi, et al. Service restoration strategy considering the volatility of distribution generations for active distribution network [J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2018, 30(1): 115-120.
- [9] 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 Jingjing, 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.
- [10] 姜惠兰,钱广超,范中林,等. 考虑负荷控制的有源配电网故障恢复策略 [J]. 中国电力, 2017, 50(3): 101-106.
JIANG Huilan, QIAN Guangchao, FAN Zhonglin, et al. A service restoration strategy considering influence of load management for distribution system with DG [J]. Electric Power, 2017, 50(3): 101-106.
- [11] 孟祥,沈澍东. 基于 Matlab 和 Matpower 的孤岛判别与处理 [J]. 电子科技, 2015, 28(10): 123-125.
MENG Xiang, SHEN Shudong. Island judging and processing based on Matlab and Matpower [J]. Electronic Science and Technology, 2015, 28(10): 123-125.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

刘星(1989—),男,山东枣庄人,在读硕士研究生,从事配电网故障恢复方面的研究(E-mail: 1449336921@qq.com)。

崔双喜(1970—),男,新疆乌鲁木齐人,副教授,工学博士,从事新能源发电及其优化控制方面的研究(E-mail: 1449622236@qq.com)。