

一种配电网故障阶段式恢复方法

刘蓓¹, 汪飒¹, 陈春¹, 黄纯¹, 曹一家¹, 张飞², 董旭柱³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东电网公司, 广东 广州 510082;
3. 南方电网电力科学研究院, 广东 广州 510082)

摘要: 为快速确定配电网故障恢复的最优方案, 提出了一种将启发式规则与优化算法相结合的故障阶段式恢复方法。各个阶段通过指标判定是否执行, 不同故障的恢复阶段不同。第一阶段采用启发式搜索方法恢复网络连通性; 第二阶段利用和声算法以电压不越限及线路不过载为目标进行重构; 第三阶段基于深度优先搜索法及负荷优先级切负荷; 第四阶段利用和声算法进行网损优化重构。为快速分析配电网的拓扑结构, 提出单联络回路的概念, 不仅可用于快速恢复故障后网络的连通性, 而且可为优化算法避免拓扑不可行解编码提供理论基础, 有效提高了运算效率。通过仿真验证了所提方法的可行性。

关键词: 配电网; 阶段式恢复; 指标判定; 单联络回路

A phased fault restoration algorithm for distribution system

LIU Bei¹, WANG Feng¹, CHEN Chun¹, HUANG Chun¹, CAO Yi-jia¹, ZHANG Fei², DONG Xu-zhu³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510082, China;
3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510082, China)

Abstract: In order to get the optimal fault restoration scheme for distribution network rapidly, this paper proposes a phased distribution network fault restoration method which integrates the heuristic search algorithm with optimization algorithm. Each stage is determined to operate or not through indexes. The restoration scheme of different faults is different. In the first stage, the heuristic search algorithm is adopted to restore connectedness of network; in the second stage, the harmony search algorithm is adopted to restore stability with the objective of voltage and line capacity being within limits; in the third stage, the overload is rejected based on the depth-first search and priority level of load; in the fourth stage, the harmony search algorithm is adopted to reconfigure for minimizing active power loss. For rapid analysis of the distribution network topology structure, this paper proposes single interconnection loop which can be used to restore connectedness of network quickly as well as provide theory foundation of avoiding infeasible solution coding for optimization algorithm, which improves the operation efficiency effectively. The simulation verifies the feasibility of the proposed restoration method.

This work is supported by National High-tech R&D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A114).

Key words: distribution network; phased fault restoration; index determination; single-tie-switch loop

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0024-07

0 引言

配电网故障快速恢复是实现智能配电网自愈控制的重要手段^[1-5]。配电网故障恢复要求恢复时间短、恢复失电负荷多、拓扑保持辐射状及恢复后保证配网安全可靠运行等。因此, 配电网故障重构为多目标多约束的组合优化问题, 其解为一组开关动作序列。

目前, 故障恢复问题的求解方法主要有启发式

搜索方法^[6-12]和智能优化方法^[13-17]两类。

文献[6]先利用启发式规则生成恢复候选方案, 再通过计算的熵权值选出最优方案; 文献[7]用树形结构表示配电网并对其分层, 减少了启发式搜索的空间, 降低了解的复杂度; 文献[8-10]采用多代理技术, 动作时间快, 但通信要求高, 且不能保证解的最优性; 文献[11]考虑负荷的优先级, 利用排序搜索方法进行求解。将专家知识转化为启发式方法的处理规则, 可减少搜索空间, 提高实时性, 但缺乏评价机制, 最优性不具说服力。

文献[13]针对配网重构特点对粒子群算法的惯

基金项目: 国家 863 高技术基金资助项目 (2011AA05A114)

性权重系数及社会学习与认知系数进行了改进;文献[14]将搜索禁忌算法用于故障恢复重构;文献[15]利用深度编码技术避免配电网重构中产生非放射状的不可行解,并利用改进的非支配遗传算法求解。智能优化算法对于复杂网络问题能很好的求解,且实现较为容易;缺点是迭代次数大,实时性不强,也易陷入维数灾难。

文献[18]将启发式算法与智能优化算法结合并分阶段实行,提出家族树来表征配电网拓扑结构,并对传统的 PSO 算法与 SA 算法进行改进,提出了协同进化算法,运用于配电网故障恢复重构。

本文采用启发式规则与优化算法相结合的阶段式方法来实现配电网故障恢复。第一阶段以开关动作数最少恢复最大量的失电负荷;第二、三阶段恢复系统的安全运行;第四阶段优化系统网损。为快速实现第一阶段,提出了单联络回路理论,这同时也为第二、四阶段的优化算法避免不可行解编码奠定基础。

1 配电网故障恢复策略

本文将配电网故障恢复过程分为四个阶段,各个阶段通过指标判断是否执行。

为方便表述,先定义以下指标:

指标 1 线路负载率;

指标 2 节点电压偏移量;

指标 3 故障修复时间。

实现流程如下:

(1) 读取配电网隔离故障断开的分段开关信息。

(2) 第一阶段:利用启发式规则恢复非故障区域的连通性。提出了单联络回路的概念(详见第 3 节),将隔离开关所在单联络回路对应的联络开关闭合既可实现。

(3) 指标判定:计算指标 1 及指标 2 并判断两者是否都达标;若是,转至(7);若否,转至第二阶段。

(4) 第二阶段:通过重构恢复配电网运行安全性。针对第一阶段未动作的联络开关,以指标 1 及指标 2 达标为目标进行优化重构。

(5) 指标判定:计算指标 1 及指标 2 并判断两者是否都达标;若是,转至(7);若否,转至第三阶段。

(6) 第三阶段:通过切负荷恢复配电网运行安全性。采用深度优先搜索法并考虑负荷的优先级进行甩负荷,直至系统达到安全运行状态。

(7) 指标判定:判定指标 3 是否小于设定时

间,若是,转至(9);若否,转至第四阶段。

(8) 第四阶段:通过重构优化网损。针对第一阶段未动作的联络开关,以总网损最小为目标、配电网安全运行为约束条件进行重构,使配电网达到经济的运行状态。

(9) 停止运行,输出恢复方案。

图 1 为配电网故障阶段式恢复流程图。

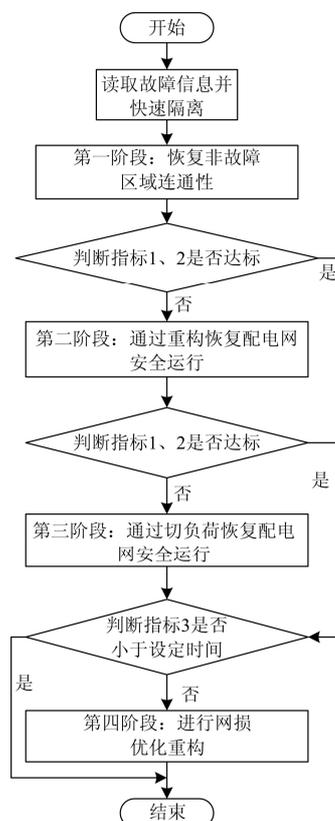


图 1 配电网阶段式故障恢复流程图

Fig. 1 Flow chart of phased fault restoration of distribution network

2 单联络回路及其在故障恢复中的应用

2.1 单联络回路的定义

配电网为闭环设计开环运行,闭合任一联络开关(Tie switch, TS)都会构成一个回路,断开回路中的任一分段开关(Section switch, SS),拓扑结构又恢复辐射状。因此,每一 TS 都可与其单独闭合构成的回路所包含的任一 SS 交换开合状态,网络仍具连通性且成辐射状。

定义:在辐射状配电网中,由一个 TS 与若干 SS 组成的回路称之为单联络回路(Single-tie-switch loop, STSL)。

显然,STSL 的数目与配电网中 TS 的数目相等。

号 (L_1, L_2, \dots, L_l), 定义零矩阵 D 。逐一找出 L_k 在 TSTL 矩阵 M 中的对应行 y_k , 将该行信息复制给矩阵 D 的第 k 行, 即矩阵 $D(k, :) = M(y_k, :)$ 。

2) 确定矩阵 D 每行的非零元素个数, 按照非零元素个数从小到大进行排序。

3) 令 $k=1$ 。

4) 将第 k 行的非零元素逐一与已确定行 (即 1 到 $k-1$ 行, $k>1$) 的所有非零元素进行比较, 若相同, 则置零, $k=k+1$ 。

5) 判断 k 是否等于 l , 若是, 则输出集合 D , 若否, 返回 4)。

6) S_i 可在相应行的非零元素中随机选取。

0/1	S_1	0/1	S_2	0/1	S_{r-1}	0/1	S_r
-----	-------	-----	-------	-----	-----	-----	-----------	-----	-------

图 3 编码形式

Fig. 3 Encoding form

3.3 网络重构实现步骤

本文采用和声算法 (HS) 进行重构, 其基本原理见文献[19]。第二阶段与第四阶段的实现步骤如下。

(1) 将第一阶段未动作的联络开关放入可操作联络开关集 $L(L_1, L_2, \dots, L_n)$ 中, 确定解的维数为 $2n$ 。

(2) 初始化 HS 算法参数。HS 算法的参数包括和声记忆库大小 (HMS)、解的维数、和声记忆库考虑概率 (HMCR)、微调概率 (PAR)、最大迭代次数 (NI) 和终止条件。

(3) 和声记忆库 (HM) 初始化。随机产生 HMS 个初始解放入 HM 中, 并计算每个解的目标函数值 $f(x)$ 。

(4) 生成新解。选择一个随机数 $r1$, 若 $r1 < HMCR$, 则在 HM 中选择一个变量, 否则在 HM 外随机选值。如果在 HM 内选值, 再选择一个随机数 $r2$, 若 $r2 < PAR$, 则对该值进行扰动, 扰动量为 bw 。对每个变量都按上述规则可构成新解; 计算新解的目标函数值 $fitness(new)$ 。

(5) 更新 HM。判断 $fitness(new)$ 是否优于 HM 中最差解的目标函数值 $fitness(HM(worst))$, 若优于, 则替换 HM 中的最差解。

(6) 判断是否满足终止条件。若满足, 终止循环; 否则, 重复步骤 (4) 和步骤 (5)。

4 算例分析

基于 Matlab R2009b 编制了故障恢复算法, 采用 IEEE33 节点测试系统, 如图 2 所示, 对系统负荷进行了改进, 改进后的总有功负荷为 2 600.5 kW, 总无功负荷为 1 610 kvar, 具体数据见附录表 1。为

验证本算法的有效性, 本文模拟 4 个单故障及 1 个双故障进行恢复性重构计算。线路的最大传输容量设为 2 800 kVA; 且假设系统中负荷都处于同一重要等级; 第二阶段和第四阶段的和声算法参数如下: $HMS=10$, $HMCR=0.85$, $PAR=0.9$, $bw=6$, 最大迭代次数 $NI=200$ 。

第一个模拟的单故障支路为 7-8, 恢复结果如表 1 所示。通过第一阶段快速恢复网络连通性得到的方案为闭合 11-21 联络开关, 该方案能满足线路不过载及节点电压不越限, 且故障能短时修复。因此, 只需执行第一阶段即可恢复供电。

表 1 第一个单故障恢复结果

Table 1 Results of the first single fault restoration

故障情况		故障恢复计算结果			
故障点	是否能	恢复	方案	最大	最小
	短时修复	阶段		负载率	电压值
7-8 支路	是	一	闭合 11-21 支路	0.804 8	0.951 5

第二个模拟的单故障支路为 20-21, 恢复结果如表 2 所示。第一阶段的恢复方案为闭合 11-21 联络开关, 该方案线路容量出现越限情况。需要通过第二阶段恢复系统的安全性, 恢复方案为闭合 7-20 联络开关, 断开 5-6 分段开关, 系统线路最大负载率由 1.030 9 下降到 0.689 1。第一阶段和第二阶段得到的综合方案满足容载比和电压值都不超标, 因此, 执行第一阶段和第二阶段即可恢复供电。

表 2 第二个单故障恢复结果

Table 2 Results of the second single fault restoration

故障情况		故障恢复计算结果			
故障点	是否能	恢复	方案	最大	最小
	短时修复	阶段		负载率	电压值
20-21 支路	是	一	闭合 11-21 支路	1.030 9	0.937 2
		二	闭合 7-20 支路 断开 5-6 支路	0.689 1	0.941 0

第三个模拟的单故障支路为 19-20, 恢复结果如表 3 所示。第一阶段的恢复方案为闭合 7-20 联络开关, 该方案线路容量出现越限情况。第二阶段的恢复方案为闭合 8-14、24-28 联络开关, 断开 12-13、27-28 分段开关, 线路最大负载率有所下降但是还不能满足要求, 需要通过第三阶段切负荷以恢复系统安全性, 第三阶段的方案为断开 11-12 支路, 线路最大负载率下降且满足要求。因此, 执行第一阶段、第二阶段和第三阶段才可恢复供电。

第四个模拟的单故障支路为 26-27, 恢复结果如表 4 所示。第一阶段的恢复方案为闭合 24-28 联络

开关，且电压和容量指标均不越限。由于故障不能短时修复，需通过第四阶段进行网损优化重构使系统达到经济的运行状态，方案为闭合 7-20、8-14、11-21 联络开关，断开 6-7、13-14、8-9 分段开关，网损由 83.782 4 kW 降到 69.138 4 kW。因此，执行第一阶段和第四阶段可恢复供电且使系统处于经济的运行状态。

表 3 第三个单故障恢复结果

Table 3 Results of the third single fault restoration

故障情况		故障恢复计算结果			
故障点	是否能短时修复	恢复阶段	方案	最大负载率	最小电压值
	19-20 支路	是	一	闭合 7-20 支路	1.057 0
二			闭合 8-14、24-28 支路，断开 12-13、27-28 支路	1.049 8	0.954 0
三			断开 11-12 支路	0.992 1	0.954 7

表 4 第四个单故障恢复结果

Table 4 Results of the fourth single fault restoration

故障情况		故障恢复计算结果				
故障点	是否能短时修复	恢复阶段	方案	最大负载率	最小电压值	损耗/kW
	26-27 支路	否	一	闭合 24-28 支路	0.999 3	0.950 8
四			闭合 7-20、8-14、11-21 支路，断开 6-7、13-14、8-9 支路	0.816 5	0.957 6	69.138 4

以 5-6、22-23 支路同时发生故障模拟双故障情况，第一阶段的恢复方案为闭合 7-20、24-28 联络开关，闭合后的线路负载率及电压值均不越限，能达到安全的运行状态。恢复结果如表 5 所示。因此，本文提出的故障恢复方法不因故障个数的增大而耗时线性增长，对于有些多故障情况，也可以快速通过第一阶段即可恢复。

表 5 双故障恢复结果

Table 5 Results of double faults restoration

故障情况		故障恢复计算结果			
故障点	是否能短时修复	恢复阶段	方案	最大负载率	最小电压值
	5-6、22-23 支路	是	一	闭合 7-20、24-28 支路	0.707 8

配电网故障恢复要求具有快速性，本文的阶段式方法中第一阶段和第三阶段的耗时很短，第二

阶段和第四阶段都采用和声搜索算法进行寻优，且参数设置相同，因此，两阶段的搜索速率大致相同。以算例网络 20-21 支路发生故障为例仿真 100 次，各次第二阶段的耗时曲线如图 4 所示。其中，平均耗时为 0.197 3 s，最小耗时为 0.124 8 s，最大耗时为 0.608 4 s。可知，采用避免不可行解的编码方式，并利用和声算法寻优能快速搜索到最优解。

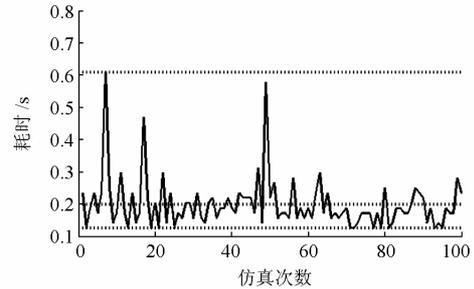


图 4 第二阶段耗时曲线

Fig. 4 Time-consuming curve of the second stage

为研究和声算法的寻优过程，以 26-27 支路发生故障为例进行仿真，第四阶段的网损最优解运动轨迹如图 5 所示。由图可知，和声算法能够在较少的迭代数内快速地寻找到全局最优解，同时满足故障恢复重构对时间的要求，体现了算法的有效性。

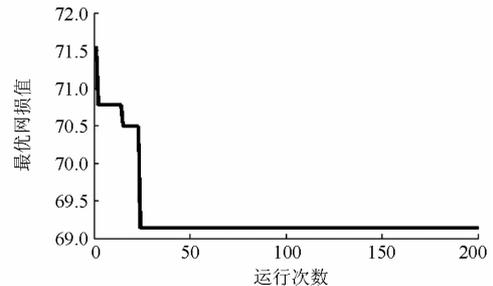


图 5 第四阶段最优解运动轨迹

Fig. 5 The best moves recorded during the search process of the fourth stage

5 结论

本文提出了一种基于启发式规则与智能算法结合的配电网快速故障恢复方法，通过算例仿真得出如下结论：

(1) 本方法能够实现配电系统中不同位置单故障和多重复杂故障下的供电恢复。故障位置、数目不同，其所经过的阶段数目可能不同，但都能找到全局最优解，且耗时较短，具有较强的实际应用价值。

(2) 本方法耗时不与故障数目呈线性关系，对于一些多故障情况也可能通过第一阶段快速恢复。

(3) 提出的单联络回路理论快速恢复了网络的连通性, 且动作开关数少; 将其运用于和声算法的编码, 有效提高了搜索效率。

(4) 本方法可以使恢复后的配电网运行于安全经济的状态。

附录

附表 1 IEEE33 系统改进负荷数据表
Table 1 Improved load data of IEEE33 system

节点号	有功负荷/kW	无功负荷/kvar	节点号	有功负荷/kW	无功负荷/kvar
0	-	-	17	63.0	28.0
1	70.0	42.0	18	63.0	28.0
2	63.0	28.0	19	63.0	28.0
3	84.0	56.0	20	63.0	28.0
4	42.0	21.0	21	63.0	28.0
5	42.0	14.0	22	63.0	35.0
6	140.0	70.0	23	294.0	140.0
7	140.0	70.0	24	294.0	140.0
8	42.0	14.0	25	42.0	17.5
9	42.0	14.0	26	42.0	17.5
10	31.5	21.0	27	42.0	14.0
11	42.0	24.5	28	84.0	49.0
12	42.0	24.5	29	140.0	420.0
13	84.0	56.0	30	105.0	49.0
14	42.0	7.0	31	147.0	70.0
15	42.0	14.0	32	42.0	28.0
16	42.0	14.0			

参考文献

- [1] 余兆荣. 配电自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.
DONG Xu-zhu, HUANG Shao-yuan, CHEN Rou-yi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [3] 卢锦玲, 白丽丽, 杨仁刚. 故障状态下电网电压自愈策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 7-12.
LU Jin-ling, BAI Li-li, YANG Ren-gang. Research on voltage self-healing strategy for grid under fault condition[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 7-12.
- [4] 袁鹏, 郭创新, 王康元, 等. 调控一体化下的配电网自愈研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 150-154.
- [5] 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.
- [6] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
ZANG Tian-lei, ZHONG Jia-chen, HE Zheng-you, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [7] 盛四清, 王峥. 基于树型结构的配电网故障处理新算法[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 42-46.
SHENG Si-qing, WANG Zheng. A new tree structure based fault processing algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 42-46.
- [8] Nagata T, Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 457-462.
- [9] 陈铁军, 宁美凤. 基于分布式 MAS 的电网自愈控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 14-18.
CHEN Tie-jun, NING Mei-feng. Study on self-healing control scheme of power grid based on distributed MAS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 14-18.
- [10] 刘新东, 李伟华, 朱勇, 等. 基于多代理技术的分布式电网自愈控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 116-120.
LIU Xin-dong, LI Wei-hua, ZHU Yong, et al. Research on self-healing control of distributed networks based on multi-agent technology[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 116-120.
- [11] Miu Karen Nan, Chiang Hsiao-Dong, Yuan Bentao, et al. Fast service restoration for large-scale distribution

- systems with priority customers and constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 789-795.
- [12] 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.
- [13] Abdelaziz A Y, Mohammed F M, Mekhamer S F, et al. Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(12): 1521-1530.
- [14] 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(8): 34-37.
LI Hai-feng, ZHANG Yao, QIAN Guo-ji, et al. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-37.
- [15] 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): 40-44.
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): 40-44.
- [16] 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.
- [17] 黄靖, 张晓锋, 陈雁, 等. 船舶综合电力系统多目标故障恢复模型及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 130-137.
HUANG Jing, ZHANG Xiao-feng, CHEN Yan, et al. Multiobjective optimal model of service restoration for integrated ship power system and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 130-137.
- [18] 汤亚芳, 陈曦, 程浩忠. 基于协同进化算法的配电网故障阶段式恢复策略[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 71-75.
TANG Ya-fang, CHEN Xi, CHENG Hao-zhong. A phased fault restoration algorithm for distribution system based on co-evolutionary algorithm of PSO and SA[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 71-75.
- [19] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics Computation, 2007, 188: 1567-1579.

收稿日期: 2013-05-13; 修回日期: 2013-05-22

作者简介:

刘蓓(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网运行优化控制与故障定位; E-mail: liubei9190@163.com

汪 泓(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压绝缘及气体放电;

陈 春(1987-), 男, 博士研究生, 从事智能配电网运行优化控制研究。