

分布式光伏接入情况下配电自动化系统的适应性

刘健¹, 林涛², 李龙², 沈兵兵³, 同向前⁴, 张志华¹

(1. 陕西电力科学研究所, 陕西 西安 710054; 2. 国家电网公司运检部, 北京 100108; 3. 国网电力科学研究所, 江苏 南京 210003; 4. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了应对分布式光伏接入配电网的挑战, 分析了分布式光伏的短路电流特征和分布式光伏接入对配电网短路电流的影响, 指出当分布式光伏接入上游母线时, 依据故障电流的传统故障定位策略完全适应。给出了分布式光伏接入馈线情形下的最不利条件, 并分析了能够满足传统故障定位策略要求的适应范围。为了满足分布式光伏超出适应范围的故障定位要求, 论述了两种应对方法, 即重合闸与分布式光伏脱网特性配合法和基于方向元件法。研究表明: 无论配电网发生三相或两相短路, 由光伏供出的短路电流都不超过其额定电流的1.5倍; 在分布式光伏接入容量不超过馈线载流量25%的条件下, 电缆馈线基本都能满足传统故障定位规则要求, 架空馈线绝大部分能满足传统故障定位规则要求。论述的两种应对方法能够满足分布式光伏超出适应范围的故障定位要求。

关键词: 配电网; 配电自动化; 分布式光伏; 短路电流; 故障定位

Adaptability of distribution automation systems to photovoltaic installation

LIU Jian¹, LIN Tao², LI Long², SHEN Bing-bing³, TONG Xiang-qian⁴, ZHANG Zhi-hua¹

(1. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100108, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 4. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To cope with the challenge of more photovoltaic (PV) installation, the impact of the distributed PVs on the short-circuit current in distribution grids is analyzed. It is pointed out that the traditional fault location approach based on the fault current is fully adequate in the case that the PVs are installed on the upstream buses. The worst condition in the case of PVs installed on the feeders is given and the adaptability ranges of traditional fault location approach are deduced. Two fault location methods are proposed for the cases of the traditional fault location approach not satisfied, such as, the reclosing based method and the fault direction detection based method. The conclusions are drawn that no more than 1.5 times of the rated current may be seen from the PV whether three phase short-circuit or two-phase short-circuit occur. Almost all of the cable and overhead line based feeders meet the requirements of the traditional fault location approach when the PV installed no more than 25% of the capacity of the feeders. The two proposed fault location methods are feasible.

Key words: distribution grids; distribution automation; distributed photovoltaic; short-circuit current; fault location

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0007-06

0 引言

分布式光伏大量接入将对配电网的短路电流产生一定的影响^[1], 需要分析这些影响的程度, 研究配电网的适应性。

在配电网故障处理方面, 配电自动化系统发挥着重要作用。配电网故障定位的理论研究成果很多, 主要方法包括: 配电网故障区段判断的统一矩阵算法^[2]及其改进算法^[3]、基于有向图的配电网故障区

域判断方法^[4]、基于分层拓扑模型的配电网故障定位算法^[5]、基于模式识别理论的配电网故障定位算法^[6]、适用于多电源复杂配电网的故障定位的新算法^[7]、启发式方案与整数规划相结合的配电网故障定位与恢复方法^[8]、基于现代优化算法的配电网故障定位方法^[9-12]。这些故障定位策略一般都是依靠短路电流在配电网上的分布来进行故障定位, 这也是目前配电网自动化系统制造企业广泛采用的故障定位策略, 称为“传统故障定位策略”, 其基本原理是: 如果一

个区域的一个端点上报了短路电流信息，并且该区域的其他所有端点均未上报短路电流信息，则故障在该区域内；若其他端点中至少有一个也上报了短路电流信息，则故障不在该区域内。传统故障定位策略对配电自动化终端要求不高，具有简单可靠的优点。

国家电网公司第一批 4 个城市、第二批 19 个城市核心区配电自动化系统试点工程已经投运，目前已经进入大规模推广应用阶段，全部都采用传统故障定位策略^[13]。为了迎接分布式光伏的大量接入的挑战，本文研究已建成的配电自动化系统故障处理策略的适应性，并研究超出适应范围情况下的应对措施。

1 分布式光伏对配电网故障电流的影响与分析

1.1 分布式光伏的短路电流特征

分布式光伏都是采用并网逆变器实现并网的，当电网发生短路故障时，光伏电源输出的电流可能剧增，主电路元件出现严重过电流。为此，分布式光伏电源的并网逆变器必须设计有相应的限流措施。

分布式光伏并网逆变器的主电路普遍采用基于 PWM 控制技术的电压源逆变器，在配网故障情况下，电压源逆变器通常采用直接电流控制的方式，通过目标调节器的输出限幅，实现了分布式光伏的输出电流限制，可将稳态短路电流 $I_{SC,PV}$ 限制在某个设定值之内。此时，分布式光伏等效为一个电流源，其输出电流如式(1)所示。其中， k_{OC} 为允许过电流倍数，取值范围通常为 1.1~1.5 左右。

$$I_{SC,PV} = k_{OC} \cdot I_{PV} \quad (1)$$

式中， I_{PV} 为分布式光伏的额定电流。

在配电网发生两相相间短路时，来自主电源的两相短路电流比三相短路电流小，其值为三相短路电流的 0.866 倍，但是，分布式光伏电源供出的短路电流并不会相应减小。

当光照达到一定值（一般为额定值的 20% 以上）时，光伏提供的短路电流与额定光照时基本一致。当光照很小时，光伏提供的短路电流会显著减小。但是，若光伏电源带有储能时，输出的短路电流与光照无关。

1.2 分布式光伏接入对配电网短路电流的影响

在配电网短路情况下，分布式电源对馈线和开关中流过的短路电流的影响可用图 1 来说明。当 2 号馈线开关 B 与 C 之间发生短路时：

(1) 主电源和各个分布式光伏均向短路点注入短路电流，短路电流增大。

(2) 短路点上游开关 S2 和开关 B 流过来自主电源、本馈线上游接入的光伏 (PV2) 和其他馈线上光伏 (PV1 和 PV4) 的短路电流；其中来自分布式光伏的短路电流使得故障段馈线电压上升，从而导致主电源供出的短路电流与没有光伏时相比有所降低。

(3) 短路点下游开关 C 也流过其后光伏 (譬如 PV3) 发出的短路电流，当此电流较大时，可能引起基于电流的传统故障定位策略判断失误。

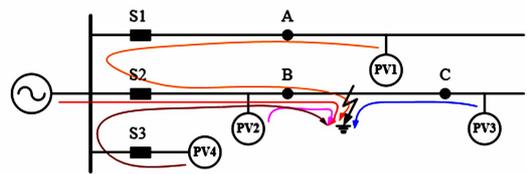


图 1 分布式光伏对配电网短路电流的影响
Fig. 1 Impact of PVs on the short current of the distribution network

2 配电网传统故障定位策略对分布式光伏接入的适应性

2.1 分布式光伏接入上游母线的情形

IEEE 起草的分布式电源并网标准 Std 1547.2 中，定义了刚性系数 (Stiffness Ratio, SR) 的概念，SR 定义为 PCC 点的短路容量与分布式电源短路容量之比，并要求刚性系数不能低于 20。国内根据《分布式电源接入电网技术规定》(Q/GDW 480-2010)，“分布式电源并网点的短路电流与分布式电源额定电流之比不宜低于 10”。

对于分布式光伏接入上游母线的情形，无论接入数量多少，在满足上述要求的情况下，因为由主电源流向故障点的短路电流远大于由分布式光伏流向故障点的短路电流，因此根据短路电流信息依靠基于短路电流信息的传统故障定位策略都能实现故障定位，但需要将分布式光伏接入点开关和分布式光伏出口开关处的采集终端的短路电流信息上报阈值均根据主电源的短路电流设置，使流过主电源供出的短路电流时超过该阈值才上报短路电流信息，但是流过分布式光伏供出的短路电流时，因未超过该阈值而不上报短路电流信息。

2.2 分布式光伏接入馈线的情形

对于分布式光伏接入馈线的情形，只要来自主电源供出的短路电流比来自分布式光伏的短路电流明显大，能够设置一个恰当的短路电流上报阈值，

将主电源供出的短路电流与分布式光伏供出的短路电流加以区分, 从而根据短路电流信息依靠传统故障定位策略就可以进行故障定位。

1) 最不利条件

系统短路容量最小的运行方式是最严酷运行方式, 因为它是主电源提供的短路电流最小的方式。

(1) 辐射式接线的馈线

在最严酷的运行方式下, 在馈线最远端发生两相相间短路故障时主电源供出的短路电流最小, 因此是最严酷的故障场景。在最严酷的运行方式、最严酷的故障场景下, 分布式光伏全部接在离电源最近的位置时对主电源供出的短路电流降低最大, 降低程度 ΔI_{SC} 最多为各个分布式光伏的等效短路电流之和 $I_{SC,PV,\Sigma}$ 。

(2) 环状网转带对侧馈线负荷时的情况 最不利条件为

①一条馈线转带对侧馈线负荷的最严酷的运行方式。

②馈线最远端发生两相短路故障的最严酷的故障场景。

③按照 ΔI_{SC} 最大为 $I_{SC,PV,\Sigma}$ (即各个分布式光伏的等效短路电流之和) 来核减主电源提供的短路电流。

④本馈线和所转带负荷馈线上的分布式光伏向故障处提供的短路电流为它们所能够提供的最大短路电流之和。

在上述最不利情况下, 主电源提供的短路电流 I_{SC}'' 最小, 如式(2)所示。

$$I_{SC}'' = \begin{cases} 0.5\sqrt{3}I_{SC} - I_{SC,PV,\Sigma} & (\text{辐射状网}) \\ 0.5\sqrt{3}I_{SC} - 2I_{SC,PV,\Sigma} & (N-1\text{环状网}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I_{SC,PV,\Sigma}$ 为单条馈线上分布式光伏的总短路电流, I_{SC} 为不考虑分布式光伏条件下馈线末端的短路电流($N-1$ 环状网时包括转带馈线的延伸段), I_{SC} 可表示为

$$I_{SC} = \frac{\dot{E}}{j\dot{X}_S + \sum_{i=1}^n \dot{Z}_i} \quad (3)$$

其中: E 为系统侧电源等效电势; X_S 为系统侧电源等效电抗; Z_1, Z_2, \dots, Z_n 为各馈线段的阻抗(它们与各条馈线段的长度及导体截面积有关)。

2) 给定分布式光伏接入容量下馈线的最大容许供电半径

设馈线的额定载流量为 I_C , 无论什么类型的配电网架, 在满足 $N-1$ 准则情况下, 当一条馈线转带

对侧馈线的部分(对于多分段多连接、多供一备网)或全部(对于“手拉手”环状网)的最严酷情形, 所供出的负荷电流最大不能超过 I_C 。

假设馈线上分布式光伏总容量占馈线额定容量的比率为 γ , 根据1.1节, 在配电网发生短路时由分布式光伏(PV)供出的短路电流最大不超过分布式光伏(PV)额定电流的1.5倍, 因此, 在最不利情形下, 本馈线及所转带负荷馈线上分布式光伏(PV)供出的最大短路电流为 $1.5\gamma I_C$, 即有

$$I_{SC,PV,\Sigma} = 1.5\gamma I_C \quad (4)$$

再考虑2倍的可靠系数 K_k , 将各个开关处的配电终端的短路电流信息上报阈值整定为不低于 $3\gamma I_C$, 此时只要能够保证在负荷转带情况下线路末端短路时主电源供出的最小短路电流不低于短路电流信息上报阈值, 就可使各个开关处的配电终端在流过主电源供出的短路电流时上报短路电流信息, 而流过分布式光伏(PV)供出的短路电流时不上报短路电流信息, 确保短路电流信息上报具有选择性, 从而根据短路电流信息依靠传统故障定位规则就能进行故障定位。值得指出, 对于 $N-1$ 环状网, 在转带情况下, 当本段馈线故障时, 故障点下游开关上的短路电流可能由本馈线光伏和转带馈线光伏共同供出, 需按 $I_{SC,PV,\Sigma}$ 的2倍考虑。

为此, 须有

$$I_{SC}'' > \begin{cases} 3\gamma I_C & (\text{辐射式馈线}) \\ 6\gamma I_C & (N-1\text{环状网}) \end{cases} \quad (5)$$

将式(2)、式(4)代入, 整理可得

$$\begin{cases} I_{SC} > 3\sqrt{3}\gamma I_C & (\text{辐射式馈线}) \\ I_{SC} > 6\sqrt{3}\gamma I_C & (N-1\text{环状网}) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(3)、式(6), 就可以计算出给定分布式光伏容量情况下, 各种导线和电缆馈线所对应的能够采用传统故障定位规则的最大供电半径(注意: 对于环状网, 最大供电半径为本馈线与所转带负荷馈线的供电距离之和)。

3) 给定馈线供电半径下分布式光伏的最大容许接入容量

在给定馈线半径的条件下, 根据式(3), 可以计算出最不利情况下, 不考虑分布式光伏接入时, 由主电源提供的短路电流 I_{SC} 。

在此基础上, 再将 I_{SC} 代入式(6), 可以计算出在给定馈线半径的条件下, 分布式光伏允许接入的最大比率 γ_{\max} , 再结合馈线的额定容量 I_C , 就可以计算出分布式光伏所允许接入的最大容量 $\gamma_{\max} I_C$ 。

3 分析结果

采用第 2 节的方法分析得出的, 在最不利条件下, 架空馈线满足传统故障定位策略的范围如图 2 所示, 横轴为供电半径, 纵轴为光伏容量, 以系统短路容量 S_d (单位: MVA) 为条件得到多条曲线组成的曲线族, 曲线下方区域为满足传统故障定位规则的范围, 表示线路额定容量的曲线下方为受馈线额定容量限制的实际允许范围。

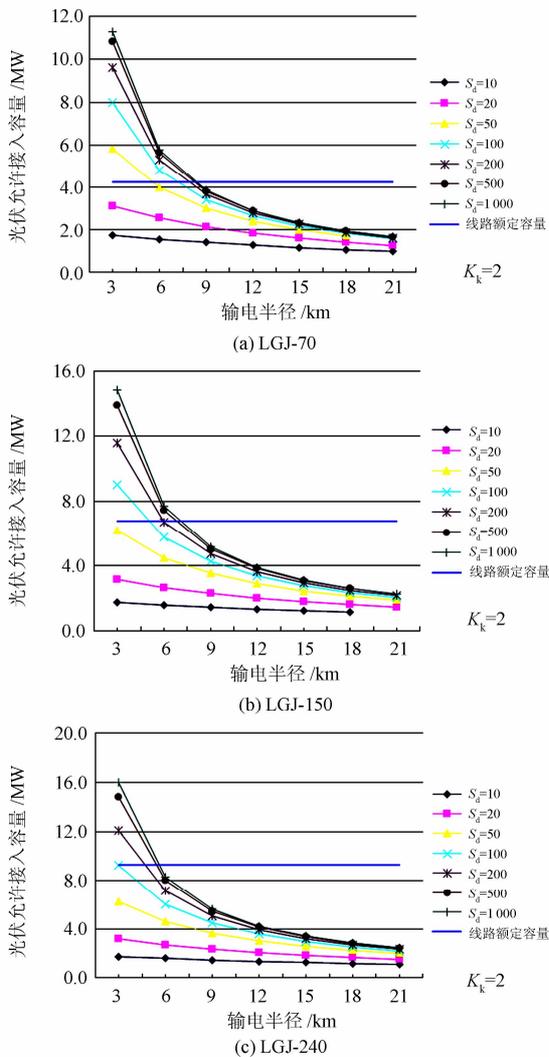


图 2 架空馈线的适应性分析

Fig. 2 Ranges to meet the requirement of traditional fault location for over-head feeders

采用第 2 节的方法分析得出, 在最不利条件下, 电缆馈线满足传统故障定位策略的范围如图 3 所示, 横轴为供电半径, 纵轴为光伏容量, 以系统短路容量 S_d (单位: MVA) 为条件得到多条曲线组成

的曲线族, 曲线下方区域为满足传统故障定位规则的范围, 表示线路额定容量的曲线下方为受馈线额定容量限制的实际允许范围。

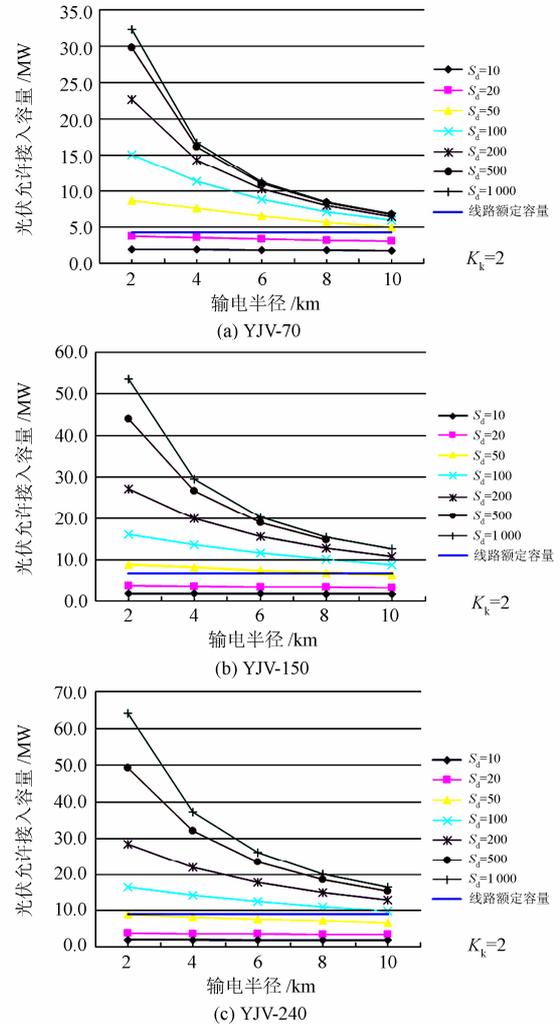


图 3 电缆馈线的适应性分析

Fig. 3 Ranges to meet the requirement of traditional fault location for cable based feeders

比较图 2 和图 3 可知, 电缆馈线比架空馈线对传统故障定位策略的适应性要好。

观察图 2 可知, 对于架空线而言, 随着馈线长度的增加, 满足传统故障定位策略的光伏接入容量显著减少。

观察图 3 可知, 对于电缆线路而言, 排除极个别系统短路容量非常小的情况以外, 能满足传统故障定位策略要求的长度都比较大。

对国网公司系统各个省公司的 10 kV 母线处系统最大、最小短路容量, 架空馈线最长、平均长度, 电缆馈线最长、平均长度等进行了调研, 城市配电

馈线供电半径大部分都在 5 km 以内,对比分析可见:

在分布式光伏接入容量不超过馈线载流量 25% 的条件下,各公司的电缆馈线基本都能满足传统故障定位规则要求、架空馈线绝大部分能满足传统故障定位规则要求。

4 应对分布式光伏超出适应范围的方法

4.1 重合闸与分布式光伏脱网特性配合法

Q/GDW480-2010《分布式电源接入电网技术规定》规定,非有意识孤岛的分布式电源必须在馈线故障后 2 s 内从电网脱离。据此,提出一种利用分布式电源脱网特性与重合闸的配合来消除短路电流中分布式电源的影响的改进配电网故障处理策略。

改进的故障处理策略如下:

(1) 馈线开关采用负荷开关,只有变电站出线断路器具备过流保护和一次快速重合闸功能,重合闸延时时间为 2.5~3.5 s。

(2) 故障发生后,变电站出线断路器过流保护动作跳闸。

(3) 2 s 后,该馈线上的分布式电源全部从电网脱离。

(4) 变电站出线断路器跳闸后经 2.5~3.5 s 延时进行重合,若是瞬时性故障则恢复全馈线供电,分布式电源逐步并入电网;若是永久性故障,则变电站出线断路器再次跳闸,此时配电自动化系统二次采集到的故障信息就排除了分布式电源的影响,可以根据短路电流依靠传统故障定位规则进行正确的故障定位。

实际上,上述改进策略对于接入任意容量的分布式电源的情形都适用,并且不必改变配电自动化系统的硬件,只需在 DA 应用软件中略加改动即可。

4.2 基于方向元件的故障定位法

对于不含分布式电源的多主电源点闭环配电网,故障功率方向有助于其故障定位,可以按照下面方法进行故障区域判断。

规则:如果一个区域至少有一个端点的故障功率方向指向该区域的内部,而没有端点的故障功率方向指向该区域的外部,则故障就在该区域的内部。

为了使用上述规则,需要量测流过开关的故障电流和电压,因此需要配备电流互感器 CT 和电压互感器 PT,终端中只需要判断出故障功率方向即可,而不需要量测故障功率值。由于分布式光伏的短路电流存在畸变,增加了故障功率方向准确量测的难度。

4.3 各种配电网故障定位方法的比较

配电网故障定位方法的比较如表 1 所示。

表 1 各种配电网故障定位方法的比较

Table 1 Comparison of various fault location approaches

方法	优点	不足	适用范围
传统定位法	简单,大量已建资源可以沿用	分布式电源接入容量大时不适应	分布式光伏接入容量 25% 时绝大部分情形可用
重合闸与分布式光伏特性配合法	简单,大量已建资源可以沿用,可快速恢复瞬时性故障	需要一次重合闸	各种分布式电源在任意接入容量下均可用
方向元件	不需要一次重合闸,不需要量测故障功率值而只需要量测故障功率方向	需要方向元件,需改造已建资源	各种分布式电源在任意接入容量下均可用

5 结论

(1) 分布式光伏大量接入对配电网短路电流会产生一定的影响。无论配电网发生三相或两相短路,由光伏供出的短路电流都不超过其额定电流的 1.5 倍;光照严重降低时,光伏供出的短路电流更小。

(2) 目前广泛采用的传统故障定位策略依靠故障电流的分布来进行故障定位,它要求来自主电源和分布式光伏电源的短路电流有显著的差异。本文给出了能够满足传统故障定位策略要求的适应范围,并指出在分布式光伏接入容量不超过馈线载流量 25% 的条件下,国网公司系统的电缆馈线基本都能满足传统故障定位规则要求、架空馈线绝大部分能满足传统故障定位规则要求。

(3) 为了满足分布式光伏超出适应范围的故障定位要求,可以采用重合闸与分布式光伏脱网特性配合法或基于方向元件的故障定位法。

参考文献

- [1] 黄伟,雷金勇,夏翔,等. 分布式光伏对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97. HUANG Wei, LEI Jin-yong, XIA Xiang, et al. Influence of distributed generation on phase-to-phase short circuit protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97.
- [2] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33. LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution

- system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [3] 马强, 张利民, 刘皓明. 配电网故障区间判断的通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 14-17. MA Qiang, ZHANG Li-min, LIU Hao-ming. General matrix algorithm for fault section detection in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 14-17.
- [4] 刘健, 程红丽, 董海鹏, 等. 配电网故障判断与负荷均衡化[J]. 电力系统自动化, 2000, 26(22): 34-38. LIU Jian, CHENG Hong-li, DONG Hai-peng, et al. Fault section identification and load balancing of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 26(22): 34-38.
- [5] 林景栋, 曹长修, 张帮礼. 基于分层拓扑模型的配电网故障定位优化算法[J]. 继电器, 2002, 30(8): 6-9. LIN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li. Optimized algorithm of fault section diagnosis for distribution networks based on hierarchical model[J]. Relay, 2002, 30(8): 6-9.
- [6] 费军, 单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 32-34. FEI Jun, SHAN Yuan-da. Study of automatic fault location system in the distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 32-34.
- [7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50. WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A novel algorithm for fault location in power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.
- [8] CIRIC R M, POPOVIC D S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method[C] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, October, 2000(22): 497-505.
- [9] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130. WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [10] 刘文轩, 严凤, 田霖, 等. 基于 LVQ 神经网络的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 90-95. LIU Wen-xuan, YAN Feng, TIAN Lin, et al. LVQ neural network approach for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 90-95.
- [11] 武娜, 焦彦军. 基于模拟植物生长算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 24-28. WU Na, JIAO Yan-jun. Fault location of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 24-28.
- [12] 王林川, 李庆鑫, 刘新全, 等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29-35. WANG Lin-chuan, LI Qing-xin, LIU Xin-quan, et al. Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 29-35.
- [13] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32. SHEN Bing-bing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.

收稿日期: 2013-12-16

作者简介:

刘健(1967-), 男, 通信作者, 博士, 总工程师, 教授, 博士生导师, 百千万人才工程国家级人选, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

林涛(1978-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电网自动化管理;

李龙(1964-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电网自动化管理。