

DOI: 10.7667/PSPC162015

基于故障树分析法的配电自动化实用化运维指标研究

黄晓明¹, 凌万水², 吴栋琪¹, 杨涛¹

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘要: 根据《配电自动化实用化验收细则》中对配电自动化运维考核要求, 重点围绕终端在线率、遥信动作正确率、遥控使用率与遥控成功率四项指标进行考核。目前对配电自动化运维指标的研究主要集中在计算方法上, 缺乏对影响各项考核指标的因子及其影响程度的研究。基于故障树提出了适用于配电自动化的实用分析方法。根据配电自动化各运维指标特性, 分析影响各指标的因子并建立故障树模型。依据比例分摊原则, 计算出各运维指标中各因子的贡献比例, 分析出各运维指标中的薄弱环节, 并根据实际的运维情况给出技术建议与管理措施, 从而优化配电自动化考核指标。在现场运维中, 对分摊率较高的因子进行监控和整改, 可有效提升配电自动化运维指标, 以保证配电自动化的正常运行。

关键词: 故障树分析; 配电终端; 比例分摊; 配电自动化

Research on practicality operation and maintenance index of distribution automation based on fault tree analysis method

HUANG Xiaoming¹, LING Wanshui², WU Dongqi¹, YANG Tao¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;

2. Shanghai Wiscom Sunest Electric Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: According to the requirements of “detailed specification of practicality acceptance for distribution automation systems”, four assessment indicators, including terminal online rate, correctness rate of remote signal, remote control usage rate and remote control success rate, are focused. At present, the researches about the operation and maintenance index of distribution automation mainly focus on the calculation methods, and are lack of the researches about the factors of influencing test index and its influencing degree. A practical analysis method of distribution automation based on fault tree is proposed. Combined with the indicator characteristics of the distribution automation operation and maintenance, it analyzes influencing factors of each index and establishes fault tree model. According to the proportional sharing principle, the contribution ratio of each factor of each operation and maintenance index is calculated. The weak link of each operation and maintenance index is identified. Then according to actual operation and maintenance condition, the technical advice and management measures are proposed to optimize the evaluation index of the distribution automation. In the actual operation and maintenance, the factors with higher allocation rate is monitored and rectified to improve the operation and maintenance index of distribution automation and ensure the normal operation of distribution automation.

Key words: fault tree analysis; distribution terminal; proportion allocation; distribution automation

0 引言

配电自动化系统是保证配电网安全可靠、经济运行的重要手段, 为配电网的监测和控制提供坚实的保障, 是建设智能配电网的基石^[1-3]。经过多

年的建设与发展, 我国在配网智能化建设方面已取得了巨大成果, 截止 2015 年底, 国家电网公司已在 26 个省(直辖市)批复了共 84 个配电自动化项目, 其中 71 个项目通过了工程验收, 年平均故障停电时间分别缩短至 29.37 min 和 18.64 min, 初步建设了涵盖范围广、建设规模大、推进速度快、应用效果好的多地区的试点智能配电网体系^[4-7]。

根据《配电自动化实用化验收细则》中对配电

基金项目: 国家电网公司科技项目“具备配电线路自组网能力的智能配电监控终端技术研究”(5211DS16000A)

自动化运维考核要求, 围绕终端在线率、遥信动作正确率、遥控使用率与遥控成功率四项指标进行考核。文献[8-13]依据国家电网公司配电自动化实用化验收准则, 对配电自动化实用化验收内容与考核评价指标分别进行了研究。目前, 关于配电自动化运维指标的研究较少, 且大多集中于考核指标计算方法上, 缺乏对影响各项考核指标的因子及其影响程度的研究。

本文结合故障树分析法与比例分摊原则, 提出适用于配电自动化实用化运维指标的分析方法。通过对影响各指标的因子进行分析, 建立四个运维指标的故障树分析模型; 根据比例分摊原则分别计算各因子对系统的贡献比例, 基于此识别配电自动化运维过程中的薄弱环节。本文最后对浙江省某区域配电自动化实际统计数据进行分析, 结果证明本方法能够真实体现配电自动化运行状况, 可以作为配电自动化运行实用化评价手段和运维依据。

1 理论基础

1.1 故障树分析法

故障树的构造是故障树分析法^[14-15]的关键, 故障树建造的完善程度将影响定性分析与定量分析的准确性。故障树建造过程即寻找系统故障和导致系统故障的诸因素之间的逻辑关系, 并用故障树的图形符号(事件符号与逻辑门符号)抽象表示实际系统故障组合和传递的逻辑关系的过程。图 1(a)给出了故障树的事件类型和逻辑门符号。图 1(b)为一故障树实例。通过故障树的建造过程可确定顶事件和其他事件间的逻辑关系。事件间的逻辑关系有并联、串联和混合三种。

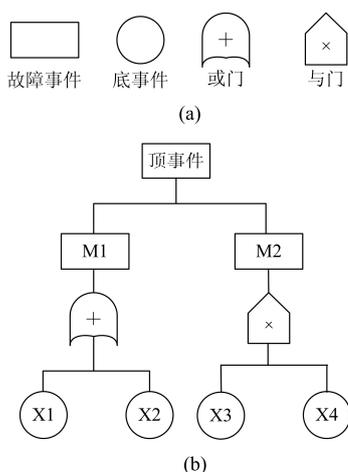


图 1 故障树

Fig. 1 Fault tree

故障树顶事件的发生概率可表示为

$$P(T) = P(MCS_1 \cup MCS_2 \cup \dots \cup MCS_N) \quad (1)$$

式中: N 是最小割集数; $MCS_i (i=1, 2, \dots, N)$ 是故障树第 i 个最小割集; $P(MCS_i)$ 为 MCS_i 的发生概率。

1.2 比例分摊准则

假设一个系统由 N 个元件组成, $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示元件 i 的失效事件, $P(x_i)$ 表示该失效事件发生的概率。根据电力系统可靠性跟踪不可靠性指标的比例分摊准则^[16], 底事件 X_i 对顶事件概率指标的贡献 $P_{S \rightarrow x_i}$ 为

$$P_{S \rightarrow x_i} = \frac{P(x_i)}{P(x_1) + P(x_2) + \dots + P(x_N)} P(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

式中, S 表示某一个包含元件 X_i 失效的顶事件失效组合。可以看出, 上述准则具有两个特征:

1) 对称性, 即 $P(x_i)$ 可以代表任一底事件。

2) 同一性, 依据比例分摊准则可以实现顶事件概率指标的完全分摊。即

$$\sum_{x_i \in X} P_{S \rightarrow x_i} \equiv P(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3)$$

2 配电自动化运维指标模型

2.1 终端在线率

终端在线率是指统计日期内在用终端设备在线时间与统计日期内终端应在线时间的比值, 不包括停电、停用、报停和检修状态的终端设备, 其计算公式为

$$\text{终端在线率} = \frac{\text{统计时间} \times \text{考核终端总数} - \text{考核终端停用时间}}{\text{统计时间} \times \text{考核终端总数}} \times 100\% \quad (4)$$

影响终端在线率的主要因素有:

(1) 终端自身故障(M1)。包括终端软件故障(X1)(包括网管配置错误因素)、终端硬件故障(X2)、电源模块故障(M4)、蓄电池故障(X10)、充电装置故障(X11)(包括电源线松动等安装因素)、安装缺陷导致终端退出运行(X3)(如二次线路安装不紧固)。

(2) 通信问题(M2)。包括通信模块故障(X4)、信号被屏蔽(X5)(针对于无线通信终端)、光分器故障(X6)、网络通道类故障(X7)(如通信光纤外破)。

(3) 环境因素(M3), 包括环境潮湿因素(X8)(如凝露受潮)、灰尘影响因素(X9)。

根据影响因素分析, 建立如图 2 所示的配电终端故障树分析图, 其中, TE 代表影响终端在线率的失效顶事件。

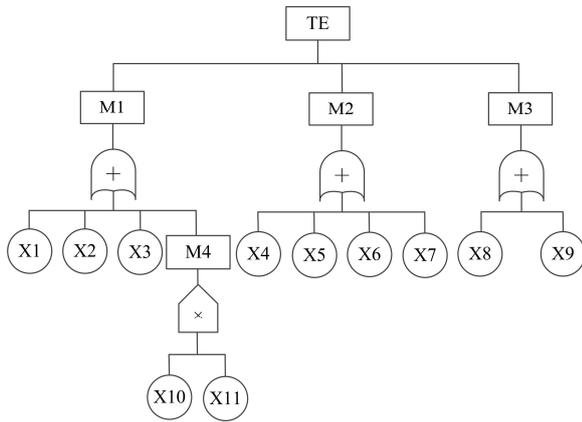


图 2 终端在线率故障树

Fig. 2 Fault tree of terminal online rate

2.2 遥控使用率

遥控使用率是指统计日期内遥控操作次数与可遥控操作次数的比值。其中，实际遥控次数包括遥控成功次数与遥控失败次数，可遥控操作次数包括实际遥控次数、三遥开关遥控的产生变化次数与三遥开关调试检修产生变化次数。影响遥控使用率的主要因素：

(1) 主站未遥控操作(M1)。包括未严格执行优先使用遥控操作(X1)、系统图纸未及时维护造成主站无法操作原因(X2)、修试中主站未将该开关运行方式切换至检修调试态原因(X3)。

(2) 终端就地操作(M2)。包括未经过调度许可现场人员自行操作原因(X4)(包括故障抢修等情况)。

根据影响遥控使用率的因素，建立如图 3 所示的配电终端故障树分析图，其中，TE 代表影响遥控使用率的失效顶事件。

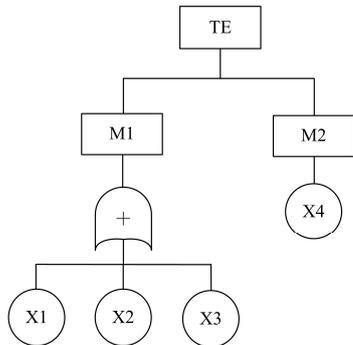


图 3 遥控使用率故障树

Fig. 3 Fault tree of remote control usage rate

2.3 遥控成功率

遥控成功率是指统计日期内遥控操作成功次数与总遥控操作次数的比率。其中，总遥控次数包括遥控成功次数与遥控失败次数。影响遥控成功率主要包含以下因素：

(1) 通信因素(M1)。包括通信模块故障(X1)、信号被屏蔽(X2)(针对于无线通信终端)、网络通道类故障(X3)(如通信光纤外破)。

(2) 终端因素(M2)。包括终端硬件故障(X4)(例如配电终端遥控插件故障)、电源故障(X5)(如操作电源故障)、对时故障(X6)、安装问题(X7)(如二次回路不紧固)。

(3) 环境因素(M3)。主要包括由于恶劣运行环境导致一次机构卡涩等问题(X8)。

(4) 主站因素(M4)。包括参数配置错误(X9)(如自动化点号错误)。

根据影响遥控成功率的因素，建立如图 4 所示的配电终端故障树分析图，其中，TE 代表影响遥控成功率的失效顶事件。

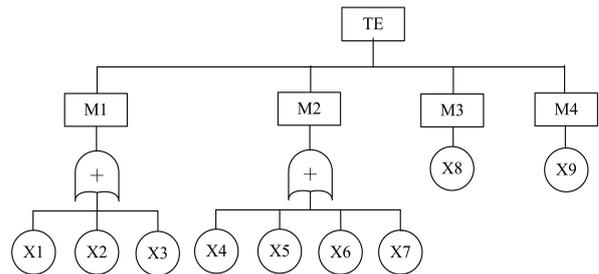


图 4 遥控成功率故障树

Fig. 4 Fault tree of remote control success rate

2.4 遥信动作正确率

遥信动作正确率是指统计日期内遥信正确次数与总遥信次数的比率。其中，总遥信次数包括遥信正确次数与遥信拒动、误动次数。影响遥信动作正确率包含以下因素：

(1) 终端遥信误动(M1)。包括触电抖动(X1)、接点粘连(X2)、强磁干扰(X3)。

(2) 终端遥信误报(M2)。包括终端遥信误判(X4)、遥信废信息(X5)(如检修开关试拉合开关)。

(3) 终端遥信拒动(M3)。包括辅助节点不对位(X6)、SOE 未匹配(X7)。

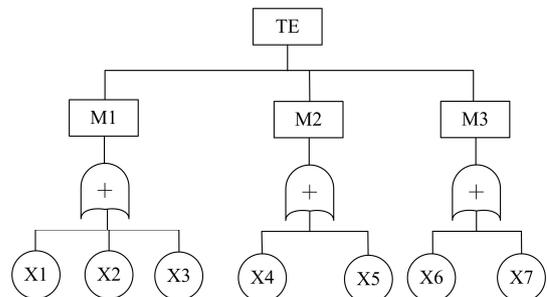


图 5 遥信动作正确率故障树

Fig. 5 Fault tree of correct rate of remote signal

根据影响遥信动作正确率的因素, 建立如图 5 所示的配电终端故障树分析图, 其中, TE 代表影响遥信动作正确率的失效顶事件。

3 基于故障树的可靠性跟踪分析

假设故障树底事件和最小割集数分别为 M 和 N , 则故障树顶事件故障概率 $P(TE)$ 应包含有 $2^N - 1$ 个失效组合。根据失效时间的比例分摊准则, 可以求得任意底事件 X_i 的失效跟踪指标为

$$P_i = \sum_{S=1}^{2^N-1} P_{S \rightarrow X_i} \quad (5)$$

为明确计算底事件对顶事件的贡献程度, 定义可靠性跟踪分摊因子(Reliability Tracking Sharing Factor)为 $RTSF_i$, 其计算公式为

$$RTSF_i = \frac{P_i}{\sum_{m=1}^M P_m} \times 100\% \quad (6)$$

$RTSF_i$ 表征每个底事件对顶事件系统故障的贡献程度。底事件 X_i 的 $RTSF_i$ 指标越大, 则该故障因子对顶事件的贡献程度越大, 这也就是说该故障事件更容易发生故障而引起顶事件故障, 应重点加强对该故障因素的运维管控。相反, 若底事件 X_i 的 $RTSF_i$ 指标越小, 则该故障事件对顶事件故障概率的贡献程度越小。

4 算例分析

本文依据浙江省某地区配电终端现场实际运行数据为样本进行配电终端失效分析。通过收集近三年内配电终端的运行检修记录, 分别对配电终端的失效概率与失效跟踪参数进行计算, 用以验证所提出的运行评价综合指标体系和综合评价方法的实用性。

4.1 原始数据处理

根据收集区域内配电终端各模块的检修记录, 从中获取所有配电终端个数 N 、各元件模块的检修次数 $n_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 与该模块检修时间 $t_i (n_i)$ 。其中, $i=1$ 表示中央控制单元模块, $i=2$ 表示操作控制回路故障底事件, $i=3$ 表示充电器模块, $i=4$ 代表蓄电池模块, $i=5$ 代表通信网络模块, $i=6$ 代表采集单元模块。

对于终端在线顶事件失效指标, 从公式(7)可以看出, 终端在线率 $= 1 - \sum_{i=1}^{11} P(X_i)$ 。

$$P(X_i) = \frac{t_i(1) + t_i(2) + \dots + t_i(n_i)}{T} \quad (7)$$

对于遥控成功率指标, 则模块 X_i 的故障概率为

$$P(x_i) = \frac{n_i}{N} \quad (8)$$

将采集到的原始数据根据式(7)、式(8)进行统计处理, 分别得到故障树中各故障事件概率, 如表 1 所示。

4.2 可靠性跟踪计算

根据表 1 所示的故障事件的可靠性参数, 应用可靠性跟踪算法, 可以分别求得配电自动化运维中各故障事件在四个实用化运维指标故障事件中的比例分摊, 如表 2 所示。图 6 为故障树中各故障事件在各运维指标故障事件中分摊的对比分析结果。从分析结果可以得知:

1) 终端在线率。运行指标主要影响因子是通信模块故障, 根据实际运行情况, 主要是 ONU 模块故障导致通信问题。

2) 遥控使用率。运行指标主要影响因子是系统图纸未及时维护造成主站无法操作原因, 根据实际运行情况, 主要是由于 GIS 和配电自动化系统中的图纸未及时维护, 导致主站无法进行遥控操作。

表 1 故障树事件及其概率

Table 1 Fault tree's events and their probabilities

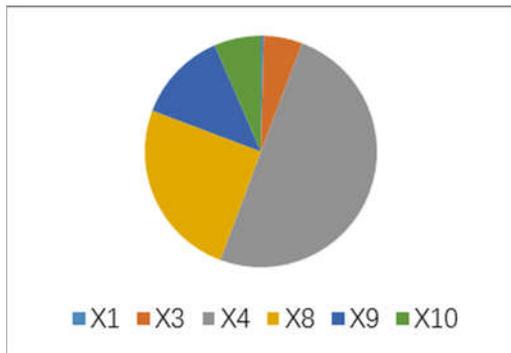
终端在线率											
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
故障率	0.19%	0	0.71%	2.61%	0	0	0	1.53%	0	1.09	0.78%
遥控使用率											
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4							
故障率	5.16%	8.23%	2.77%	3.92%							
遥控成功率											
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9		
故障率	0	0	0.97	6.79%	0	0	2.91%	5.83%	0.97%		
遥信动作正确率											
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7				
故障率	0	0	0	1.16%	2.71%	0	6.23%				

表 2 故障事件失效率分摊
Table 2 Allocation of the failure rate of fault events

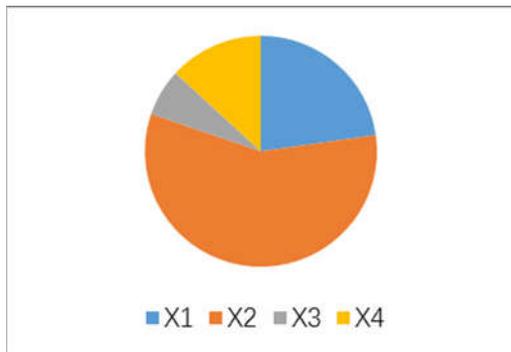
终端在线率										
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
失效率分摊	7.35e-7	0	1.03e-5	9.47e-5	0	0	0	4.76e-5	2.41e-5	1.24e-5
<i>FTSF</i>	0.39%	0	5.41%	49.89%	0	0	0	25.06%	12.73%	6.52%
遥控使用率										
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4						
失效率分摊	5.61e-4	1.41e-3	1.63e-4	3.25e-4						
<i>FTSF</i>	22.75%	57.49%	6.59%	13.16%						
遥控成功率										
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	
失效率分摊	0	0	2.01e-5	9.08e-4	0	0	1.98e-4	7.71e-4	2.01e-5	
<i>FTSF</i>	0	0	1.05%	50.88%	0	0	9.42%	37.59%	1.05%	
遥信动作正确率										
故障事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
失效率分摊	0	0	0	2.72e-5	1.48e-4	0	7.76e-4			
<i>FTSF</i>	0	0	0	2.86%	15.55%	0	81.59%			

3) 遥控成功率。运行指标主要影响因子是终端硬件故障，根据实际运行情况，主要配电终端遥控插件导致遥控不成功。

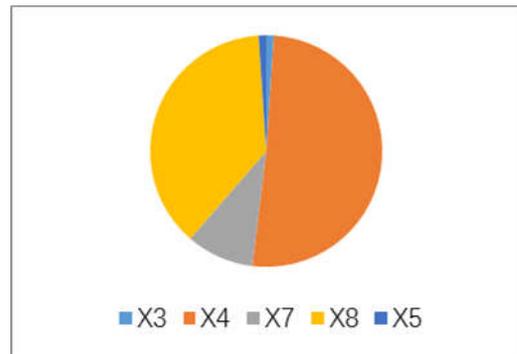
4) 遥信动作正确率。运行指标主要影响因子是 SOE 未匹配，根据实际运行情况，主要遥信变位未匹配到合理 SOE 的动作记录。



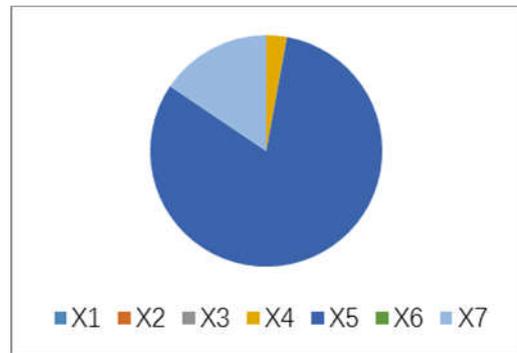
(a) 终端在线率



(b) 遥控使用率



(c) 遥控成功率



(d) 遥信动作正确率

图 6 故障事件分摊对比

Fig. 6 Comparison of fault events allocation

根据以上的分析，在实际运维当中，采取合适的措施可以优化各实用运维指标。

1) 终端在线率：消除 ONU 容易发生故障的问题。应逐步对配电自动化区域内所有的 ONU 设备

进行更新升级。

2) 遥控使用率: 要求图形管理人员及时维护 GIS、配电自动化系统图纸, 保证系统内图纸与现场运维条件一致。

3) 遥控成功率: 加强配电终端遥控插件验收和定检的管理, 加强监控及时反馈, 做好的终端插件等备品备件的储备。

4) 遥信动作正确率: 加强配调、自动化、二次班组的信息沟通, 发现故障及时传递, 收到任务及时处理, 减少误遥信持续时间。

在对某地区配电终端现场采取以上技术与管理建议之后, 再次进行数据收集与分析, 发现各故障发生概率明显下降。终端在线率中通信模块故障率由 2.61% 下降到 0.59%, 遥控使用率中系统图纸未及时护造成主站无法操作的故障率由 8.23% 下降到 2.11%, 遥控成功率中终端硬件故障率由 6.79% 下降到 0.53%, 遥信动作正确率中 SOE 未匹配故障率由 6.23% 下降到 0.97%。

5 结论

本文提出了基于故障树的配电自动化实用化指标的分析方法。根据配电自动化各运维指标特性, 分析了对各指标的影响因子并分别建立了故障树模型; 依据比例分摊原则, 计算出各运维指标中各因子所分摊的贡献比例, 据此识别出各运维指标中的薄弱环节, 并根据实际的运维情况给出了技术建议与管理措施, 以便优化配电自动化考核指标。在实际的现场运维中, 通过对分摊率较高的因子进行重点监控和整改, 可有效提升配电自动化运维指标, 以保证配电自动化的正常运行。

参考文献

- [1] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Coordination of relay protection for power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [2] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-125.
LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-125.
- [3] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [4] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Smart distribution grid and distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41.
- [5] 刘东, 丁振华, 滕乐天. 配电自动化实用化关键技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 16-19.
LIU Dong, DING Zhenhua, TENG Letian. Practicability key technology & its development of distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 16-19.
- [6] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化, 2005, 36(19): 6-10.
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 36(19): 6-10.
- [7] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.
KANG Chengong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [8] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 12-16.
WANG Liang. Discussion on application practice of distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 12-16.
- [9] 王必恒, 欧阳文, 张怡然, 等. 配电自动化实用化指标分析及诊断决策[J]. 供用电, 2014(5): 54-58.
WANG Biheng, OUYANG Wen, ZHANG Yiran, et al. The analysis and diagnosis decision of the utility index of distribution automation[J]. Distribution & Utilization, 2014(5): 54-58.
- [10] 梁茜, 张轩, 陈德超, 等. 配电自动化实用化运行指标智能监测系统的设计与应用[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 77-81.
LIANG Qian, ZHANG Xuan, CHEN Dechao, et al. Design and application of distribution automation in

- practical operation index of intelligent monitoring system[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 77-81.
- [11] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [12] 钟清, 张文峰, 余南华, 等. 主动配电网谐波预测预警方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 50-56.
ZHONG Qing, ZHANG Wenfeng, YU Nanhua, et al. Research on harmonic forecasting and warning of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 50-56.
- [13] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [14] 邵延峰, 薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2007(1): 72-74, 77.
SHAO Yanfeng, XUE Hongjun. Application of fault tree analysis in system fault diagnosis[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2007(1): 72-74, 77.
- [15] 高明, 李文云, 袁德君, 等. 使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的量化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 58-63, 69.
GAO Ming, LI Wenyun, YUAN Dejun, et al. Completeness degree quantitative analysis of dispatching automation system emergency preplan based on FTA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 58-63, 69.
- [16] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.
ZHOU Ning, MA Jianwei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.

收稿日期: 2016-12-08; 修回日期: 2017-01-16

作者简介:

黄晓明(1969—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为配网自动化; E-mail: 13605717725@139.com

凌万水(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网; E-mail: lingws2010@foxmail.com

吴栋萁(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为配网自动化。E-mail: 13957121373@139.com

(编辑 张爱琴)