

# 配电网快速复电系统关键技术研究

陆宏治<sup>1</sup>, 陈娟<sup>2</sup>, 王维航<sup>2</sup>

(1. 广州供电局有限公司, 广州 510620; 2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

**摘要:** 随着社会的不断发展进步, 人们对供电可靠性提出越来越高的要求, 配网自动化作为提高供电可靠性的一种重要技术手段已被广泛应用。目前地区电网的配网自动化系统仍在建设完善当中, 通信通道不可靠、终端在线率低造成故障信息不足, 以及电网拓扑结构更新不及时等, 导致无法准确进行故障定位和故障恢复, 已严重影响了地区电网实现快速复电。提出了一种能有效解决上述问题的快速复电系统解决方案, 对该方案的几个关键技术分别进行了阐述, 并利用 IEEE33 节点配电系统进行了验证。

**关键词:** 快速复电; 状态估计; 拓扑辨识; 故障定位

**中图分类号:** TM727.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2014)01-0101-05

## Research on the Key Techniques of Quick Service Restoration in the Distribution Network

LU Hongzhi<sup>1</sup>, CHEN Juan<sup>2</sup>, WANG Weihang<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the development of society progress, the public demands a higher level of the power supply reliability, so the distribution system automation has been widely applied. During the construction of the distribution automation system, the goal of quick service restoration has been seriously influenced by the insufficient fault information due to the unreliable of communication channel, the low online rate of distribution automation terminals, and the distribution topology error caused by updating timely, so fault section location and service restoration can not properly work. This paper proposes a solution of quick service restoration system which can solve the above problems and expounds its key techniques respectively. Case studies of IEEE33 bus system demonstrate the proposed solution.

**Key words:** quick service restoration; state estimation; topology identification; fault section location

随着社会经济和电力供求市场的不断发展, 用户对供电可靠性、电能质量及优质服务提出更高的要求。配电网自动化是保证配电网的安全经济运行和提高电能质量的必由之路<sup>[1]</sup>。

目前地区电网的配网自动化系统的建设仍在不断完善中。大部分地区的配电自动化通信系统采取电力载波和无线公网的通信方式, 其可靠性低致使部分遥测和遥信量丢失或不正确; 加上自动化终端自身因缺乏后期维护和环境等因素的影响出现损坏

导致其不在线; 并且从 GIS 系统导入配网拓扑时存在图模不一致问题。这些问题均会导致主站系统所获取的配网拓扑与实际不符, 即拓扑错误情况, 从而造成故障定位不准, 故障处理所需时间更长, 严重影响该地区供电可靠性的提高。

针对上述问题, 本文提出了一种快速复电系统, 能在减小用户停电时间, 提升第三方客户满意度, 实现快速复电方面发挥积极作用, 同时在配网自动化系统由建设走向成熟的过渡阶段, 该系统可作为提高故障处理效率的有效措施。

### 1 广州配网自动化应用现状分析

广州地区配电网覆盖面积广, 中心城区电缆

收稿日期: 2014-08-15

作者简介: 陆宏治(1984), 男, 广东广州人, 助理工程师, 硕士, 主要从事电力信息系统建设与集成等工作(e-mail)benlhz@163.com。

化程度很高，而郊区则存在大范围的架空线或者电缆与架空线混合的馈线，因而目前故障处理方式多样。大体上可分为两种：其一是不具备配网自动化条件下，安装在馈线首端的具有电流速断保护功能的断路器跳闸，整条馈线失电，现场巡线人员对该失电馈线的故障位置进行排查。这使得故障处理时间达数小时甚至更长，特别是当故障发生在恶劣天气，或线路架设于地形复杂地区及夜间时候，人工巡线的方式会给巡视人员查找故障造成更大的困难，严重影响供电可靠性的提高；其二则是在具备一定的配网自动化条件下，调度员通过自动化监控系统判断故障发生区段，指导急修人员去到指定区段对故障进行排查。显然，相比之下，配网自动化系统在故障处理中具有更快的响应速度，有利于减小用户停电时间，同时还能避免耗费大量人力物力，因此，配网自动化系统是发展的必然。

然而，在具备一定的配网自动化水平的白云区、花都区、黄埔区以及番禺区等地区，在实际运行中遇到配电自动化系统定位不准、终端在线率不高等问题，这严重影响到该系统在故障处理过程中发挥作用，具体原因有以下两方面：一方面是自动化终端装置因后期维护工作不到位和环境等因素的影响经常出现损坏、电池失效等问题，导致自动化主站无法获取该终端状态，进而无法指导下一步的故障处理；另一方面是现阶段地区配电网终端与子站、终端与主站、子站与主站之间使用较多的通信方式为质量较差的无线公网与电力载波，而使用效果更好但耗资更大的无线专网和光纤通信方式正在建设中，因此通信系统不可靠也是导致终端不在线的十分重要的原因。加之在从 GIS 系统向配电自动化系统导入配网拓扑图时存在图模不一致的问题，导致目前的配网自动化系统在故障处理中收效甚微，现场仍然主要依靠人工巡线的方式排查故障，耗费时间多，直接影响整个配网供电可靠性的提高，同时十分不利于供电企业与用户之间构建的良好关系。

因此，为保证配网自动化系统准确率，提高故障处理效率，提升客户满意度，拓扑结构不准的问题亟需得到解决。更换可靠性更高的自动化终端和建设质量更好的无线专网和光纤通信系统耗资巨大，短时间内无法完成，为此，本文提出一种能有

效解决现阶段的拓扑错误和故障定位不准问题的快速复电系统。

## 2 快速复电系统整体方案

正确的拓扑结构是配网自动化其他应用如故障定位和故障恢复等的前提。故据此本文提出的快速复电系统包括状态估计与拓扑辨识、故障定位和故障恢复三个部分如图 1 所示。

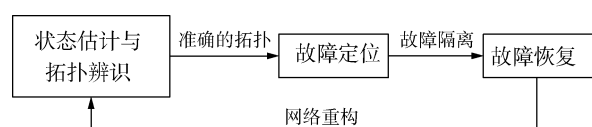


图 1 快速复电系统构成图

Fig. 1 Composition of Quick Service Restoration System

状态估计能为配网自动化的其他应用提供高精度的数据支撑，并在一定程度上剔除不良数据的影响；拓扑辨识方法利用上一时刻状态估计结果和下一时刻的量测数据对配电网的拓扑结构进行检测，从而修正拓扑错误支路；故障定位方法则以准确的拓扑结构为前提，采用基于 95598 系统的故障定位方法，能在故障发生后因通信不可靠导致部分遥测和遥信信息丢失的情况下实现故障区段定位；故障恢复同样以正确拓扑为前提，在保持网络辐射状和网络电压、潮流约束下最多的恢复失电负荷，然而故障恢复伴随着开关操作即配网重构，因此图 1 中的反馈过程表示对配网拓扑进行实时更新。考虑到文章篇幅限制及目前模式化故障恢复方案实施效果良好，下文不再赘述。

可以看到，状态估计与拓扑辨识为故障定位和故障恢复提供准确的数据和拓扑，从而因拓扑不准所增加的故障处理时间将大幅缩短，供电可靠性因此得到大幅提高。下面对该快速复电系统的几个关键技术分别进行阐述。

## 3 快速复电系统关键技术

### 3.1 状态估计

配电网状态估计能在硬件投入较少的前提下，利用实时量测的冗余性，应用数值算法把远动终端实时取得的精确度低、不完整、偶尔还带有不良数据的生数据，加工成精度高、完整、可靠的熟数据，输出全配电网的实时网络状态，向其他高级应用软件提供可靠而全面的实时运行方式，

是 DMS 中高层应用的数据之源, 并在一定程度上决定了其他分析应用的精确性和有效程度。目前应用最多的是基本加权最小二乘法状态估计<sup>[2]</sup>, 如式所示。

$$\min J(x) = [\mathbf{h}(x) - \mathbf{z}]^T \mathbf{W} [\mathbf{h}(x) - \mathbf{z}] \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为状态变量;  $\mathbf{z}$  为量测量;  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  为量测函数;  $\mathbf{W}$  为量测权重矩阵。目标函数取最小值的  $x^*$  在其极值点上, 因此有  $dJ(x)/dx=0$ 。用牛拉法解所得到的非线性方程, 其第  $k$  次修正量和第  $k+1$  次迭代量可用式(2)和式(3)表示。

$$\Delta x^k = [\mathbf{H}^T(x^k) \mathbf{W} \mathbf{H}(x^k)]^{-1} \mathbf{H}^T(x^k) \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(x^k)] \quad (2)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (3)$$

其中  $\mathbf{H}(x) = \frac{\partial \mathbf{h}(x)}{\partial (x)}$ , 为量测 Jacob 矩阵。

$\mathbf{G}(x) = [\mathbf{H}^T(x^k) \mathbf{W} \mathbf{H}(x^k)]^{-1}$  为信息矩阵。式(3)为迭代方程,  $x^k$  为第  $k$  次状态估计的状态变量,  $\Delta x^k$  为第  $k$  次状态估计计算的迭代量。迭代计算直到  $\Delta x^k$  小于设定阈值 ( $\max |\Delta x^k| \leq \varepsilon_x$ ), 此时的状态量  $x$  即为所求。

根据所选取的状态变量的不同, 配电网状态估计算法大致可分为基于节点电压、支路功率以及支路电流三种<sup>[3]</sup>。考虑到配电网呈辐射状的特点, 且其状态估计计算以单条馈线为单位, 因此本文采用基于支路电流幅值和相角的状态估计算法, 该算法能处理电压量测数据, 计算精度高且收敛性好。

支路量测所对应的量测方程为:

$$I_{lm}^e = I_{lm} \quad (4)$$

$$P_l^e = V_{sm} I_{lm} \cos(V_{sa} - I_{la}) \quad (5)$$

节点量测对应的量测方程为:

$$P_i^e = V_{im} I_{lm} \cos(V_{ia} - I_{la}) - \sum_{j \in NL} V_{im} I_{jm} \cos(V_{ia} - I_{ja}) \quad (6)$$

$$V_{im}^e = V_1 \cos V_{ia} - \sum_{l \in FL} Z_{lm} I_{lm} \cos(Z_{la} + I_{la} - V_{ia}) \quad (7)$$

式中  $I_{lm}^e$ 、 $P_l^e$ 、 $P_i^e$  和  $V_{im}^e$  分别为支路电流幅值量测、支路有功量测、节点有功量测和节点电压幅值量测。同理可得无功量测方程, 在此不再赘述。支路  $l$  的首端和末端分别为节点  $s$  和节点  $i$ ,  $V_{sm}$  和  $V_{sa}$ 、 $V_{im}$  和  $V_{ia}$  表示节点  $s$  和  $i$  的电压幅值和相角;  $V_1$  为馈线根节点的电压幅值;  $I_{lm}$  和  $I_{la}$  则表示支路  $l$  的电流幅值和相角;  $Z_{lm}$  和  $Z_{la}$  为支路  $l$  的阻抗幅值和相角。 $NL$  表示以节点  $i$  为父节点的支路集合,  $FL$  表示节点  $i$  到根节点 1 的路径所包含的所

有支路集合。

基于支路电流幅值和相角的状态估计算法步骤为: ① 1 次前推回代得到初始化节点电压和支路电流; ② 计算量测误差  $r(I_{lm}^k, I_{la}^k) = z - h(I_{lm}^k, I_{la}^k)$ ; ③ 根据量测方程形成 Jacob 矩阵  $\mathbf{H}(I_{lm}^k, I_{la}^k)$ ; ④ 由式(2)计算迭代量, 若满足收敛条件, 计算结束, 否则前推电压计算后返回步骤②。

### 3.2 拓扑辨识

在实际采用的远动系统中, 一旦开关遥信与开关实际位置不相符, 则称网络拓扑错误。拓扑错误可以划分为开关实际未变位, 而终端上传信息反映开关状态变化, 即报告拓扑错误和实际系统中发生拓扑变化, 但由于通信中断等缘故导致主站系统未做出相应反应, 即未报告拓扑错误。其中最难辨识的是突然断开且未报告错误情况, 下面以该情况为例阐述拓扑辨识方法。

目前用于拓扑辨识的方法主要有突变量启动法、网络结构搜索辨识法、参数估计法及新息图法。由于配网量测数据匮乏, 因此本文所述的快速复电系统采用对量测数据要求最低的新息图法进行拓扑辨识<sup>[4,5]</sup>。具有预报功能的新息图法是一种动态状态估计方法, 其利用测量值和上一时刻的状态估计值之差的新息向量(式(8)所示)来检测、识别坏数据和拓扑错误等不正常事件。

$$v_{k+1} = z_{k+1} - h(x_k) \quad (8)$$

式中  $z_{k+1}$  为  $k+1$  时刻量测量,  $h(x_k)$  为  $k$  时刻量测估计值,  $v_{k+1}$  即为  $k+1$  时刻的新息值。

由新息向量构成且满足电路原理的图为新息图, 如图 2(c) 所示。根据置换原理和叠加原理可得到图 2。

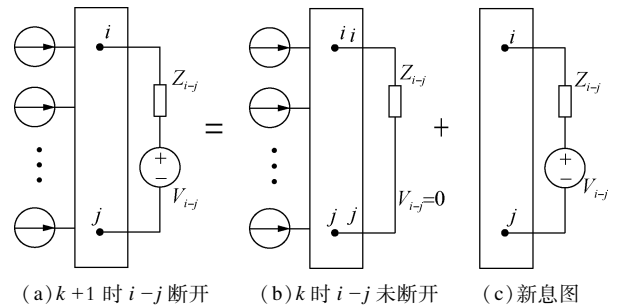


图 2 叠加原理的应用

Fig. 2 Application of the Superposition Principle

由电路原理可知, 任意支路  $i-j$  均可用图 2(a) 中附加电势源  $V_{i-j}$  和线路阻抗  $Z_{i-j}$  表示, 若该

支路为闭合, 则  $V_{i-j} = 0$ ; 若断开则根据置换原理,  $V_{i-j}$  大小等于该支路开路电压, 且该支路电流为零。新息图中, 所有节点的注入电流均为零, 网络中的电势源仅为线路的附加电势。当不存在拓扑错误时, 所有线路的附加电势皆为零, 图 2 (c) 中所有的新息量也均为零; 而当存在突然断开拓扑错误时, 拓扑错误支路的电势源等于其开路电压, 新息向量不为零, 且在拓扑错误支路附近幅值较大。

新息图法应用于配电网, 需增加地节点, 且对每个节点构造一条对地支路。由于配网中每个配电变压器均配备有功量测且相当于一个负荷节点, 因此将除根节点外的其他节点对地支路选为连支, 根据电路原理且利用直流模型即可计算全网新息值:

$$P_{extend} = CP_{link} \quad (9)$$

式中  $C$  是支路-回路关联矩阵,  $P_{link}$  为连支真实新息,  $P_{extend}$  为支路计算新息。在排除了坏数据影响后, 定义估计潮流值  $\bar{P}_{ij}$ :

$$\bar{P}_{ij} = P_{extend-ij} + P_{pre-ij} \quad (10)$$

其中  $P_{pre-ij}$  为  $k$  时量测估计值。

考虑误差的影响, 对于未报告拓扑错误的断开线路应满足 2 个条件: 一是计算新息值的绝对值很大; 二是潮流估计的绝对值较小。若某条支路同时满足上述 2 个条件, 则该支路为拓扑错误的支路, 开关实际状态应为断开。同理可知突然合上且未报告拓扑错误时, 判据一与突然断开且未报告错误一致, 判据二为该支路估计潮流的绝对值较大。满足上述两个条件则说明该开关的实际状态为闭合。

新息图法还能辨识多重拓扑结构错误, 同时能辨识不良数据的影响和负荷突变情况。以测量值减去上一时刻估计值为真实新息值, 计算新息值减去真实新息值作为差别向量。根据差别向量即可判别不良数据和负荷突变。树枝坏数据表现为较大的差别向量独立存在, 而连支坏数据则会形成由较大的差别向量构成的不良回路, 负荷突变则引起突变节点上游支路构成突变回路。

因此, 在量测数据相对匮乏的配电网, 该方法在保证量测数据和拓扑质量方面十分有效。

### 3.3 故障定位

目前架空馈线自动化方案主要采用的是重合器

与电压-时间型分段器配合, 该方法通过重合器和分段器按预先整定的时间自动地实现故障定位和故障隔离功能。自动化监控系统根据分段器状态得出故障区段。但由于通信系统质量差等原因常导致终端上传的部分遥信信息错误或丢失, 致使调度员无法从自动化监控系统得到故障区段, 进而故障处理时间变长。

针对上述问题, 本文所提出的快速复电系统采用基于故障投诉信息的故障定位方法。该方法根据配网拓扑形成故障定位决策表<sup>[6]</sup>, 从 95598 系统获取用户投诉信息并匹配决策表, 再通过 95598 系统对关键信息缺失的区域进行电话回访以获取其供电情况信息, 根据这些信息匹配决策表, 从而迅速确定故障区域。该方法无需获取故障暂态信息, 通过 95598 系统实现简单, 同时增强供电部门与用户交流, 有利于双方建立良好关系。

## 4 算例

如图 3 所示的 IEEE33 节点配电系统, 其具体网络参数和负荷数据参考文献[7]。

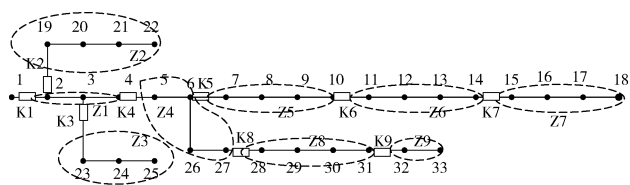


图 3 IEEE33 节点配电系统

Fig. 3 IEEE33 Bus Distribution Network

以拓扑错误、不良数据和负荷突变发生在同一分支线上的最复杂情况为例来说明新息图法的有效性。假设支路 3-23 发生突然断开且未报告拓扑错误, 节点 3 负荷突变减小至 0, 且节点 23 有功量测为坏数据, 该值实际应为 0, 但量测结果仍为 90, 同时树枝支路 6-7 为坏数据, 由 1 093 变为 500。为体现配电网量测点较少的特点, 本算例仅在支路 1-2、4-5、6-7、10-11、14-15、2-19、3-23、27-28 和支路 31-32 的首端配备量测和具有电流速断保护功能的断路器 ( $K1, K2, \dots, K9$ ) 或经整定的馈线自动化开关。图中以开关和线路末端为端点将馈线分割成为 9 个区域 ( $Z1, Z2, \dots, Z9$ )。

新息图法辨识结果如表 1 所示。

表 1 新息图法辨识结果

Table 1 The Identification Result Based on Innovation Graph

支路	测量值	估计值	计算新息	真实新息	差别向量	修正计算新息	修正估计潮流
1-2	2 838.9	3 896	929.7	1 057	127.28	1 019.7	2 876.3
4-5	2 210.4	2 211	0.29	1	1.29	0.29	2 211.3
6-7	500	1 093	0.04	593	593.04	0.04	1 093.1
10-11	560.1	560.0	0.12	0	0.12	0.12	560.14
14-15	270.8	270.9	0.11	0	0.11	0.11	270.84
2-19	361.0	361	0.06	0	0.06	0.06	361.03
3-23	0	939	840.21	939	98.79	930.21	8.78
27-28	821.9	822.1	0.1	0	0.10	0.10	822.15
31-32	270.2	270	0.18	0	0.18	0.18	270.2

由表 1 可知, 支路 6-7 的差别向量为 593.04 并单独存在, 因此该支路的量测 500 为坏数据, 修正为 1 093; 支路 1-2 和支路 3-23 差别向量分别为 127.28 和 98.79 说明存在连支坏数据导致的不良回路, 且节点 23 负荷为 90, 其对地连支 0-23 新息值为 0, 支路 3-23 的差别向量大小与节点 23 的负荷大小相差不多, 因此可以判断节点 23 量测为坏数据; 排除坏数据的影响后得到支路 3-23 的修正新息值很大为 930.21, 估计潮流很小仅为 8.78, 所以支路 3-23 发生拓扑错误。同时, 由支路 1-2 与支路 3-23 的修正新息值之差为 89.49, 节点 3 的对地连支新息值的绝对值为 90 可知, 节点 3 发生负荷突变。由此可见, 新息图法不仅能辨识拓扑错误, 还能有效排除负荷突变和不良数据的影响。

若未进行拓扑辨识, 上述情况下根据基于 95598 系统的故障定位方法所获取的故障定位决策表如表 2 所示, 表中“1”表示该区域失电, “0”则表示未失电。拓扑辨识出支路 3-23 为断开支路, 此时故障定位决策表变成表 3 所示。

若支路 3-23 发生突然断开且未报告错误情况的同时区域 4 发生故障, 区域 3、4、5、6、7、8、9 均失电。若 95598 系统接到来自区域 3、5、7、8 内的用户投诉电话, 系统还需确认区域 1、2、4、6 的供电情况, 因此通过 95598 系统对待确认区域进行回访(当涉及待回访区域较多时可根据二分法原理进行回访以提高效率), 结果显示区域 1、2 未失电, 区域 4、6 失电。

表 2 未辨识拓扑错误时故障定位决策表

Table 2 Decision Table of Fault Location Without Topology Identification

样本	区域									故障区域
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	区域 1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	区域 2
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	区域 3
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	区域 4
5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	区域 5
6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	区域 6
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	区域 7
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	区域 8
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	区域 9
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	无

表 3 拓扑辨识后故障定位决策表

Table 3 Decision Table of Fault Location After Topology Identifying

样本	区域									故障区域
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	区域 1
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	区域 2
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	区域 3
4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	区域 4
5	0	0	1	0	1	1	1	0	0	区域 5
6	0	0	1	0	0	1	1	0	0	区域 6
7	0	0	1	0	0	0	1	0	0	区域 7
8	0	0	1	0	0	0	0	1	1	区域 8
9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	区域 9
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	无

若未进行拓扑辨识, 根据表 2 查不到相应样本, 无法判断故障区域; 若通过新息图法进行拓扑辨识后, 根据表 3 中样本 4 可知故障发生在区域 4。根据未进行拓扑辨识得到的故障定位决策表有时还会得出错误的结论。如图 3 中假设支路 2-19 和 3-23 同时发生突然断开且未报告拓扑错误, 区域 4 发生故障, 则根据表 2 样本 1 得出故障位于区域 1 的错误结论, 由此可见拓扑辨识的重要性。

### 5 结论

本文所述的快速复电系统以配网自动化系统的应用现状为出发点, 状态估计与拓扑辨识方法为故障定位和故障恢复方法提供准确的配网拓扑和潮流数据; 基于 95598 系统的故障定位方法从目前配网

(下转第 110 页 Continued on Page 110)

## 参考文献:

- [1] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 98 - 105.  
HUANG Jiadong, LUO Weiqiang. New Algorithm to Identify Inrush Current Based on Improved Mathematical Morphology [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 98 - 105.
- [2] 马静, 王增平, 吴颀. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166 - 171.  
MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A Novel Method to Rapidly Identify Inrush Current and Internal Fault Current Based on Variation Characteristic of Fundamental Current Amplitude [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166 - 171.
- [3] 郑涛, 张婕, 高旭. 一起特高压变压器的差动保护误动分析及防范措施 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 92 - 97.  
ZHENG Tao, ZHANG Jie, GAO Xu. Analysis on a Mal-operation of Differential Protection for Ultra-high Voltage Transformer and Its Countermeasure [J]. Automation of Electric Power Systems. 2011, 35(18): 92 - 97.
- [4] 承文新, 刘志超. 变压器差动保护涌流制动原理分析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 90 - 92.  
CHENG Wenxin, LIU Zhichao. Analysis of Inrush Restraint

- Theory for Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 90 - 92.
- [5] 金恩淑, 刘丽丽, 姜龙澈, 等. 变压器电流差动保护改进方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 47 - 51.  
JIN Enshu, LIU Lili, JIANG Longzhe, et al. An Improved Method of Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems. 2008, 32(9): 47 - 51.
- [6] 赵萍. 一起主变差动保护误动实例分析及对策探讨 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 104 - 107.  
ZHAO Ping. Analysis and Countermeasures on a Case of Mal-Operation of Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 104 - 107.
- [7] 郑涛, 曹志辉. 基于模糊逻辑的变压器励磁涌流二次谐波闭锁方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 61 - 65.  
ZHENG Tao, CAO Zhihui. Scheme for Second Harmonic Block of Magnetizing Inrush Current in Transformers Based on Fuzzy Logic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 61 - 65.
- [8] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power System Analysis [M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 105 页 Continued from Page 105)

自动化通信系统可靠性不高的现状出发, 以人工的方式补全缺失遥信量进而快速实现故障定位, 从而达到减小停电时间, 提高可靠性的目的。

## 参考文献:

- [1] 陈竟成, 徐德超, 于尔铿. 配电网故障恢复系统 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 46 - 50.  
CHEN Jingcheng, XU Dechao, YU Erkeng. Distribution Fault Detection, Isolation and Restoration System in a Distribution Management System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 46 - 50.
- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1985.
- [3] 熊文, 武鹏, 余浩斌. 基于负荷测录系统的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 84 - 87.  
XIONG Wen, WU Peng, YU Haobin. State Estimation of Distribution Network by the Load Monitor System [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 84 - 87.
- [4] 周苏荃. 新息图法拓扑错误辨识 [J]. 电力系统自动化,

2000, 24(4): 23 - 27.

ZHOU Suquan. An Innovation Graph Approach to Topology Error Identification [J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(4): 23 - 27.

- [5] 周苏荃, 柳焯. 负荷突变、拓扑错误和坏数据三者交叠的识别问题 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 6 - 10.  
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. The Identification of Three Simultaneous Anomalies of Sudden Load Change and Topology Error and Bad Data [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 6 - 10.
- [6] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于故障投诉电话信息的配电网故障定位粗糙集方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 64 - 66.  
SHU Hongchun, SUN Xiangfei, SI Dajun. A Rough Set Approach to Distribution Network Fault Location Based on Fault Complain Call Information [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 64 - 66.
- [7] MESUT E B, WU F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401 - 1407.

(责任编辑 黄肇和)