

配电自动化主站的容错故障定位方法

刘健, 张志华, 张小庆

(陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了提高配电网的故障处理性能, 建议采用多重化配置反映开关状态的辅助接点和“三取二”原则以提高开关状态信息采集的容错性能的方法。论述了一种利用电气量的关联关系实现开关状态容错的方法, 以及可以应用于中压配电网相间短路故障定位、单相接地故障定位以及基于故障投诉信息的低压配电网故障研判中的基于贝叶斯法的容错故障定位方法。并给出了在单相接地定位中的应用例子, 分析结果表明所建议方法具有可行性和有效性。

关键词: 配电网; 配电自动化; 相间短路故障; 单相接地; 故障报修; 故障定位; 容错

Fault location with robustness for distribution automation systems (DAS)

LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing

(Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: To improve the performance of fault processing in distribution networks, an approach of multiplication of auxiliary contacts arrangement with two-in-three principle is proposed to improve the correctness of switch state detection. The approach of correcting the errors of switch states based on the correlation of electrical telemetering information is described. A unified method based on Bayes evaluation to improve the robustness of fault location for interphase short circuit, single phase grounding and fault location of low voltage distribution networks on account of the trouble call information is put forward. An example of single phase grounding location is given to illustrate the proposed approach, showing its feasibility and effectiveness.

Key words: distribution networks; distribution automation; interphase short circuit; single phase grounding; trouble call; fault location; robustness

0 引言

配电自动化系统的监控对象数量众多且工作在户外恶劣条件下, 有时会因为辅助接点氧化、受到干扰、短暂通信障碍等原因, 造成上报到配电自动化主站的数据采集信息漏报、误报或错报现象^[1]。

准确采集开关状态信息才能正确反映配电网的运行方式, 而可靠地掌握配电网的运行方式, 是包括故障定位、供电恢复和运行方式优化等在内的高级应用的基础, 因此需要深入研究开关状态的容错方法。

相间短路故障定位是配电自动化系统的最重要功能之一^[2], 但是配电自动化主站收集到的故障信息往往不全甚至存在差错^[3], 尤其对于大量采用故障指示器的系统, 上述现象更容易发生。而故障的准确定位是故障隔离和供电恢复的前提, 因此有

必要提高相间短路故障定位的容错能力。

我国配电网的中性点大多采取非有效接地方式, 单相接地准确检测的难度较大, 尤其在经过较大过渡电阻接地的情况下更是容易造成单相接地信息漏报、误报甚至错报的现象^[4]。另外, 单相接地检测方法比较多^[5-6], 多种单相接地检测方法得到的结果往往也不一致。因此, 有必要研究综合利用各种单相接地检测信息并具有一定容错能力的方法。

基于95598故障报修信息进行推断, 是低压配电网故障研判的有效手段^[7], 但是由于受到用户主观原因和知识水平等因素的影响, 在故障报修信息中包含着一些不确切甚至错误信息, 给低压配电网的故障定位带来困难。因此, 有必要研究具有一定容错能力的故障研判方法。

在上述领域中已经有许多容错方法的研究成果, 文献[8-9]研究了基于遗传算法的配电网故障定

位方法,具有一定的容错能力;文献[10]研究了基于免疫算法的配电网故障定位方法;文献[11]研究了基于蝙蝠算法的配电网故障定位方法;文献[12]提出了一种基于电流连续性判据的在故障信息不足时的配电网故障定位方法;文献[13]提出了一种基于粗糙集(RS)和神经网络(NN)的配电网故障定位方法;文献[14]研究了模糊推理系统在配电故障恢复中的应用;文献[15-16]研究了基于贝叶斯法的配电自动化系统故障定位方法。

上述研究成果具有一定的参考价值,但是还需要进行更加深入系统的研究。比如:需要研究采取多重化手段以及利用电气量的关联性实现开关状态容错判断的实用方法;贝叶斯法是一种非常好的具有容错能力的信息融合方法,利用该方法提高相间短路容错性的研究成果已有报道,但还需要研究不仅满足相间短路定位需要,而且满足单相接地定位和低压配电网故障定位需要的基于贝叶斯法的容错故障定位方法的一般形式。本文即探讨上述问题。

1 开关状态的容错方法

1.1 多重化和“三取二”原则

由于馈线开关大都工作于户外恶劣条件下,反映开关状态的辅助接点容易氧化而影响相应遥信量采集的正确性。

多重化配置辅助接点有助于解决上述问题,但需采取科学的策略。

采用两套辅助接点的“双点遥信”方式并不能提高开关状态采集的正确率。例如:如果采用一套辅助接点时能正确反映开关状态的概率 p_C 为0.9,那么采用两套辅助接点时,只有在这两套辅助接点都正确时才能正确反映开关的实际状态,这个概率只有 $0.9 \times 0.9 = 0.81$ 。

采用三套辅助接点并应用“三取二”的策略时,只有在下列情况会发生“误报”:

三套辅助接点都错,概率为 $0.1 \times 0.1 \times 0.1 = 0.001$;

一套辅助接点对,另外两套辅助接点都错,概率为 $0.9 \times 0.1 \times 0.1 \times 3 = 0.027$;

其余情况下都能正确反映反映开关状态,也即正确反映开关状态的概率显著上升至 $1 - 0.001 - 0.027 = 0.972$ 。

1.2 利用开关变位前后电气量的关联实现容错

对于开环运行的配电网,在配电自动化系统主站收到开关变位信息时,利用开关变位前后电气量的关联关系可以实现一定的容错。

1) 采集到开关由合闸到分闸时的容错

假设采集到一台原本处于合闸状态且有负荷

L (可以是有功功率或各相电流)流过的开关由合闸到分闸变位信息,当符合下列场景之一时,可以确认发生了开关分闸。

(1) 该开关上游侧带电、下游侧同步失电,且流过开关的负荷同步降至零漂值以下。

(2) 流过位于该开关上游的开关的负荷同步减少与 L 大致相同的数值。

(3) 若该开关下游存在相邻开关,且相邻开关断口两侧的电压以及流过的负荷同步降至零漂值以下。

实际当中,“同步”可取主站的两个遥测数据刷新周期;“大致相同”一般可取为 L 的5%~10%。

例如,主站收到某开关跳闸信息,有功功率由632 kW同步降至0,但由于其两侧TV配置错误,主站收到的来自开关的遥测信息与(1)不完全相符,据此不能确认该开关确实分闸。但是,流经该开关上游的开关的有功功率由1804 kW同步降至1145 kW,负荷减少659 kW,相对632 kW的误差为 $4.2\% < 5\%$,因此根据(2)可以确认该开关确实发生了分闸。

2) 采集到开关由分闸到合闸时的容错

假设采集到一台原本处于分闸状态且只有一侧带电的开关由分闸到合闸变位信息,当符合下列场景之一时,可以确认发生了开关合闸。

(1) 该开关下游侧同步带电,且流过开关的负荷同步上升至 L' 明显大于零漂。

(2) 流过位于该开关上游的开关的负荷同步增加与 L' 大致相同的数值。

(3) 若该开关下游存在相邻开关,且相邻开关在与该开关相连侧的断口与该开关同步带电。

例如,主站收到某开关合闸信息,由于该开关下游负荷很轻遥测值接近零漂,且下游侧TV断线,主站收到的来自开关的遥测信息与(1)和(2)不完全相符,据此不能确认该开关确实合闸。但是,该开关下游存在相邻开关,主站收到的该相邻开关的遥测信息表明它的断口在与该开关相连侧同步带电,因此根据(3)可以确认该开关确实合闸。

1.3 未收到变位信息时利用电气量的关联实现容错

对于未收到变位信息的情形,也可以利用电气量的关联实现开关状态容错。

1) 实际合闸开关误判为分闸的纠错

设 $p_2(0)=1$,当前序号为 k ,当前未误判概率为 $p_2(k)$,每当符合下列场景之一时,更新未误判概率 $p_2(k+1)=p_2(k)p_C$, $k=k+1$:

(1) 该开关流过显著大于零漂值的负荷,当流过其的负荷变化为 L 时,流过其上游开关的负荷也同步变化大致相同的数值。

(2) 当流过该开关下游开关的负荷变化为 L 时, 流过该开关的负荷也同步变化大致相同的数值。

当前误判的概率 $p_1(k)$ 为

$$p_1(k)=1-p_2(k) \quad (1)$$

当满足式(2) 时, 则可认为将实际合闸开关误判为分闸了, 可将该开关纠正为合闸状态。

$$p_1(k)>P_{\text{set}} \quad (2)$$

例如, 主站反映某开关处于分闸状态, 但观测到流过其上的负荷有时显著大于零漂。设 $p_c=0.6$, $P_{\text{set}}=0.99$ 。

某时刻观测到当其增大 230 kW 时, 流经其上游开关的负荷也增大 223 kW, 相对偏差小于 5%, 符合(1), 则: $p_2=1 \times 0.6=0.6$, $p_1=0.4$ 。

一段时间后, 又观测到流经该开关的负荷减小 623 kW 时, 流经其上游开关的负荷也减小 601 kW, 相对偏差小于 5%, 此时: $p_2=0.6 \times 0.6=0.36$ 。

观测到 10 次类似的符合 1) 的证据后, 有: $p_1=0.994>P_{\text{set}}$ 。此时可认为将实际合闸开关误判为分闸了, 可以将该开关纠正为合闸状态。

2) 实际分闸开关误判为合闸的纠错

与 1) 类似, 每当符合如下场景时, 更新未误判概率:

该开关流过的负荷始终小于零漂值, 且一侧电压在零漂值以下, 相应侧存在相邻开关, 且相邻开关断口两侧的电压以及流过的负荷都在零漂值以下。

例如, 主站反映某开关处于合闸状态, 且一侧电压在零漂值以下, 相应侧存在相邻开关, 且相邻开关断口两侧的电压以及流过的负荷都在零漂值以下, 因此符合纠错场景, 此时: $p_2=1 \times 0.6=0.6$, $p_1=0.4$ 。

观测到 10 次类似的符合纠错场景的证据后, 有: $p_1=0.994>P_{\text{set}}$ 。此时可认为将实际分闸开关误判为合闸了, 可以将该开关纠正为分闸状态。

1.4 三种容错措施的综合应用

多重化和“三取二”原则能够显著减少由于辅助接点缺陷带来的遥信误报, 但需要三套辅助接点, 而且不能解决配电终端缺陷、配电子站缺陷以及配电自动化主站缺陷或数据库配置差错带来的遥信误报问题。

开关状态错误都是起源于遥信变位误报的, 利用开关变位前后电气量关联关系的容错措施就是辨别主站收到的开关变位是否可信的。

当利用开关变位前后电气量关联关系进行容错的证据不够充分时, 就需要在未收到变位信息时利用电气量的关联实现容错。这是一个“以时间换

空间”的过程, 往往需要积累一段时间的证据后才能做出判断。

无论采取什么容错措施, 只要发现少许不一致(如“三取二”原则中 3 个证据中有一个不一致)的情形, 就需要报警并形成记录, 提示运行人员及时进行消缺。

2 基于贝叶斯法的容错故障定位

综合采取第 1 节的容错措施后, 配电网的开关状态就能比较可靠地反映实际情况, 为配电网故障定位奠定了良好的基础。

配电网故障定位是配电自动化的重要功能, 涉及中压配电网相间短路故障定位、单相接地故障定位以及基于故障投诉信息的低压配电网故障研判。

尽管健全信息条件下中压配电网相间短路故障定位方法已经非常成熟, 但是实际当中经常出现故障信息漏报、误报以及错报现象, 在大量采用故障指示器的系统中, 这种现象更容易发生。由于单相接地信息检测的复杂性, 也容易造成单相接地信息漏报、误报甚至错报的现象。由于故障报修人员并非专业人士, 投诉信息中一般也存在大量差错。这些都是配电网故障定位所面临的客观困难。

但是, 对于配电网故障定位问题, 也有许多有利条件可以用来进行容错。

例如, 对于中压配电网相间短路故障定位问题: 受拓扑约束, 故障信息间存在相互关联, 三相故障信息间存在相互关联, 保护动作引起开关跳闸构成故障信息冗余, 永久性故障在重合闸过程中产生信息冗余……。

例如, 对于单相接地故障定位问题: 受拓扑约束, 故障信息间存在相互关联, 多种故障检测原理构成故障信息冗余……。

例如, 对于低压配电网故障研判问题: 有经验的客服人员会从多个角度询问投诉人员形成信息冗余、不同位置的多个的投诉人员本身即构成信息冗余、电量采集系统提供的信息进一步加大了信息冗余……。

合理利用上述有利条件可实现容错故障定位, 本节论述一种基于贝叶斯法的容错定位方法。

设故障信息正确的概率为 P_C , 则故障信息错误(包括漏报、误报与错报)的概率为 $1-P_C$ 。在实际当中, 首先需要通过恰当的设计和资源配置尽量保证故障信息的及时准确性, 因此可以认为故障信息正确的概率 P_C 是一个较大的值, 如 0.7~0.9。

将各种可能的故障位置都当做故障假设, 对于第 i 个故障假设, 根据故障信息可以得到该故障假

设正确的条件概率 $p_h(i)$ 为

$$p_h(i) = \prod_{j \in \Lambda} P_{C,j} \prod_{k \in \Omega} (1 - P_{C,k}) \quad (3)$$

其中: Λ 为与故障假设相符的故障信息的集合; Ω 为与故障假设不相符的故障信息的集合。

综合各种故障假设, 第 i 个故障假设正确的可能性 $P_h(i)$ 为

$$P_h(i) = \frac{p_h(i)}{\sum_{i=1}^N p_h(i)} \quad (4)$$

其中, N 为故障假设的总数。

3 实例

图 1(a)所示为一个典型的架空配电网, 矩形框代表开关, 实心代表处于合闸状态, 空心代表处于分闸状态。

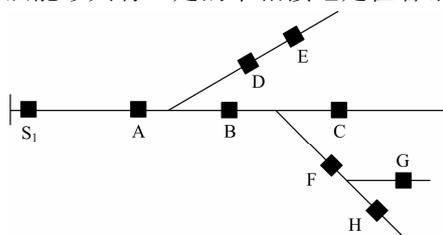
假设, 通过采取多重化和“三取二”原则, 以及第 1 节描述的容错方法后, 各个开关的状态的正确性已经很高。

在各个开关处, 安装了同时具备基于暂态分量的参数识别原理和相电流突变原理的单相接地定位装置, 并能向配电自动化主站上报单相接地是否发生在定位装置安装处下游的定位信息。

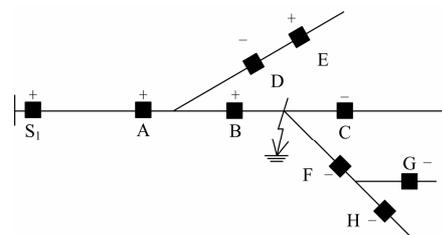
在图中, 若定位装置检测到单相接地发生在下游, 则上报信息用“+”表示, 若定位装置未检测到单相接地发生在下游, 则上报信息用“-”表示。

假设在由开关 B、C 和 F 围成的区域内发生了单相接地, 基于暂态分量的参数识别原理上报的定位信息如图 1(b)所示, 基于相电流突变原理上报的定位信息如图 1(c)所示, 由图可见它们均含有差错。

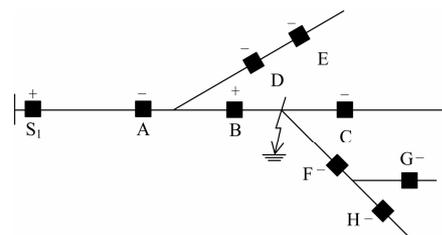
设 $P_C=0.9$, 则单独基于暂态分量的参数识别原理上报的定位信息得到的各个区段单相接地的可能性如图 1(d)所示, 开关 B、C 和 F 围成的区域故障概率最高, 为 66.94%; 单独基于相电流突变原理上报的定位信息得到的各个区段单相接地的可能性如图 1(e)所示, 开关 S、A 围成的区域和开关 B、C 和 F 围成的区域故障概率最高, 均为 42.16%, 可见, 贝叶斯法能够具有一定的单相接地定位容错性, 进



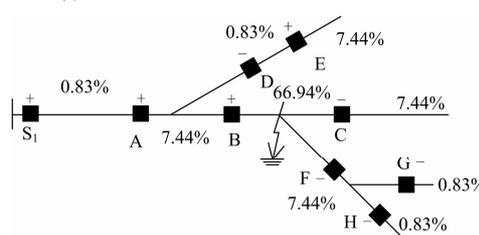
(a) 一个典型的架空配电网



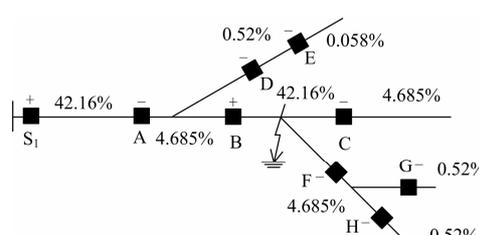
(b) 基于参数识别原理上报的定位信息示意图



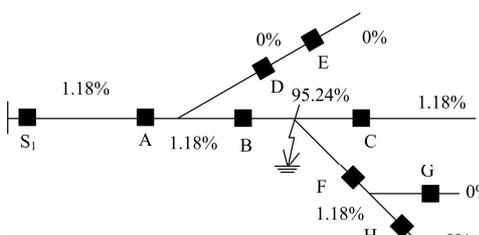
(c) 基于相电流突变原理上报的定位信息示意图



(d) 单独基于参数识别原理上报的定位信息计算得到的各区段单相接地概率



(e) 单独基于相电流突变原理上报的定位信息计算得到的各区段单相接地概率



(f) 融合参数识别原理和相电流突变原理上报定位信息得到的各区段单相接地概率

图 1 基于贝叶斯原理的单相接地容错定位示例

Fig. 1 Example of robust location for single-phase grounding fault based on Bayes approach

一步综合两种原理上报信息后得到的各个区段单相接地的可能性如图 1(f)所示, 开关 B、C 和 F 围成的区域故障概率最高, 为 95.24%, 综合两种原理上报信息后可显著提升容错性。

4 结论

1) 采用多重化配置反映开关状态的辅助接点和“三取二”原则可以显著提高开关状态信息采集的容错性能。

2) 利用开关变位前后电气量的关联能够实现开关状态信息容错, 即使对于未收到开关变位信息的情形, 也可以利用电气量的关联实现开关状态容错。

3) 采用贝叶斯法可以实现故障信息存在漏报和错报情况下的容错故障定位, 可以应用于中压配电网相间短路故障定位、单相接地故障定位以及基于故障投诉信息的低压配电网故障研判中。

参考文献

- [1] 刘健, 刘东, 张小庆, 等. 配电自动化系统测试技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [2] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57.
- [3] 刘健, 赵倩, 程红丽, 等. 配电网非健全信息故障诊断及故障处理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 50-56.
LIU Jian, ZHAO Qian, CHENG Hongli, et al. Robust fault diagnosis and restoration for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 50-56.
- [4] 刘健. 利用冗余提高配电自动化系统的容错能力[J]. 供用电, 2016, 33(6): 31-34.
LIU Jian. Improve the robustness of distribution automation systems by utilizing the data redundancy[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(6): 31-34.
- [5] 郑顾平, 杜向楠, 齐郑, 等. 小电流单相接地故障在线定位装置研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 135-139.
ZHENG Guping, DU Xiangnan, QI Zheng. Research and implementation of neutral ineffective single-phase ground fault online location device[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 135-139.
- [6] 张姝, 何正友, 林圣, 等. 基于充放电暂态特征的谐振接地系统单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 13-20.
ZHANG Shu, HE Zhengyou, LIN Sheng, et al. Fault location based on charge and discharge transient characteristic of the single-phase fault in the resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 13-20.
- [7] 蔡建新, 刘健. 基于故障投诉的配电网故障定位不精确推理系统[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 57-61.
CAI Jianxin, LIU Jian. An uncertainty reasoning system based on trouble call information for location faults on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 57-61.
- [8] 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 Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [9] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [10] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
ZHENG Tao, PANG Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [11] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [12] 陈鹏, 滕欢, 滕福生. 故障信息不足时配电网故障定位的方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 71-72.
CHEN Peng, TENG Huan, TENG Fusheng. An algorithm for fault location in power distribution network under the condition of lack of fault information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 71-72.

- [13] 孙雅明, 廖志伟. 基于不同 RS 与 NN 组合的数据挖掘配电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 31-35.
SUN Yaming, LIAO Zhiwei. Assessment of data mining model based on the different combination rough set with neural network for fault section diagnosis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 31-35.
- [14] TROVATO M, DELVECHIO G, BUALOTI R. A fuzzy reasoning approach for distribution automation[J]. Power Technology Budapest 99, IEEE, 1999(1): 249.
- [15] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.
WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu. Fault location based on Bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57.
- [16] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.
LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.

收稿日期: 2016-07-10

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, 新世纪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

张志华(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术;

张小庆(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 葛艳娜)