

基于故障影响域和预想集的变电站综合诊断方法研究

由于智能变电站各个智能电子设备（IED）之间广泛采用光纤进行通信，根据变电站的层次结构和物理连接，建立了变电站物理链路网络节点模型，从该模型出发建立变电站虚实回路信息映射模型。根据链路各个故障环节的影响域不同，通过对告警信息的分析引入故障预想集，建立故障概率和故障影响域准确度两个指标进行故障集的评判，最终确定故障环节。以变电站结构和间隔告警信息为算例证实了该方法能够有效地进行变电站物理链路层的故障定位。

刘清泉 郝晓光 何 磊/国网河北省电力公司电力科学研究院

0 引言

基于IEC 61850规范的智能变电站分为站控层、间隔层和过程层。其中站控层包括监控主机、运维终端等设备；间隔层包括继电保护设备、测控设备等智能电子设备（IED），过程层则包括合并单元、智能终端等智能电子设备^[1-2]。间隔层和过程层之间的通信一般基于面向通用变电站事件协议（GOOSE），如果IED设备之间有通信异常，则在监控报文中显示链路告警^[3-6]。链路异常是变电站运维经常遇到的问题，实际应用中经常靠人工定期检修来预防，但这种检修方法极易造成人、财和物的浪费，且在检修间歇期出现故障只能靠人工逐一排查，不仅设备得不到有效利用，而且定位的准确度也难以保证^[7-11]。同时链路异常报警还存在着一定的误报率，引起链路报警的原因也可能不止一种，可能是由于物理通道上的某一环节或某些环节故障，因此这些都给运维人员带来了更多的困难。

近年来由于二次设备之间传输信息中断而引起的变电站故障也在不断增加，加强对变电站的在线监测和故障诊断成为亟待解决的课题。本文通过建立变电站物理链接网络节点模型以及虚实回路之间的映射关系模型，从故障元件影响域着手，根据告警内容引入预想故障集概念，计算各预想故障的发生概率，确定故障位置，从而有效解决物理链路故障定位这一问题。

1 变电站链路故障

引起变电站链路告警的原因有很多，为有效地进行链路故障的定位，本文按故障产生的原因进行分类，将链路故障分为：链路软故障和链路硬故障。

1.1 链路软故障

变电站链路软故障是指两个智能电子设备的发送方或者订阅方的配置信息错误。该类故障主要为两IED设备的控制块（gocb）名称、APPID和SVID等信息不一致，导致两侧设备通信信息检查不匹配，进而产生链路告警，此类故障一般只存在于具有虚端子联系的IED设备，通常通过重新配置两侧相关信息进行处理。

1.2 链路硬故障

变电站链路硬故障是指站内的光纤回路具有明显的物理断点，例如发生光缆断裂、端口损坏、插件和设备故障等。该类故障在变电站二次运行中经常发生，其影响范围根据故障元件的不同而不同，通常需要根据一系列的方法进



刘清泉/工程师

关键词/Keywords

智能变电站·
网络节点模型·
虚回路·
影响域·
故障集·

行故障定位，通过更换受损硬件进行故障处理。

2 变电站物理链路网络节点模型

基于IEC 61850的变电站包括三层网络结构，每一层的设备之间都是通过光纤进行连接，将每一个物理设备进行IEC 61850建模，并将其视为一个节点，根据各个设备的实际连接关系便可得出变电站的物理链路网络节点模型，如图1所示。

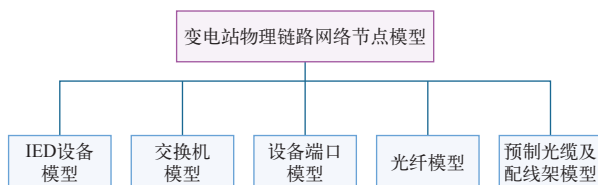


图1 物理链路网络节点模型

2.1 交换机模型

交换机模型按照《智能变电站保护设备在线监视与诊断技术规范》中规定的模型建立^[12]，其逻辑节点包括物理装置信息节点（LPHD）、公共信息逻辑节点（LLNO）、各端口统计信息逻辑节点（APST）、各端口邻居信息逻辑节点（APNE）和告警信息逻辑节点（GGIO）。建立的交换机模型能够支持物理链路通断信息的获取和上送。

2.2 IED端口模型

根据《智能变电站保护设备在线监视与诊断技术规范》^[12]，在IED设备端口下面添加远方端口信息，其中包括对端IED名称（RemDev-iedName）、IED端口号（RemDev-Port），当配置两个设备的物理端口时，分别把发送方和接受方的端口信息写入到对侧就可以表示该条物理连接的关系，按照此方法建立每根光纤连接设备端口后，就可以形成整个过程层的物理连接拓扑关系。

2.3 光纤及配线架模型

光纤建模主要包括两部分：光纤号和两侧物理设备，如表1所示。变电站光纤配线架的作用主要是光纤的转接，因此配线架可根据IEC 61850的IED端口模型建模，其中的元素包括：<P type = “Plug” >、<P type = “Port” >、<P type =

“Type” >。其端口的连接与其他IED设备一样建模。

表1 光纤模型

光纤号	本侧设备	对侧设备
Cable1	IED1	IED2

3 变电站虚实回路映射模型

3.1 虚回路信息

通过解析变电站配置描述（SCD）文件可以得出所有的二次回路虚端子的连接关系，根据IEC 61850《工程继电保护应用模型》，其PORT端口按照“板卡号—端口号”的格式来写入，通过在虚端子内部短地址前加入上述端口信息，就可表征该虚端子信息的接收插件和端口号，例如：“intAddr = “1 - A; PIGO/GOINGGIO1.DPCSO1.stVal”表示接收该虚端子信息的板卡号为1，端口号为A。

3.2 虚实回路映射

根据上述从SCD文件的“Input”元素中获得所有的虚端子地址信息，从中提取出接收端口号以及所连接的外部IED设备，由于虚端子连线信息由唯一的物理链路来承载，可采用拓扑搜索算法，以虚端子接收端口为起点搜索对端的IED设备的插件及访问点，将找到的该物理链路与虚端子连线相匹配。若中间经过交换机则要根据光线连接标示继续搜索，直至找到对端IED设备，这样遍历完所有的虚端子后，便建立起了虚回路和物理回路的一一映射关系。建立流程如图2所示。

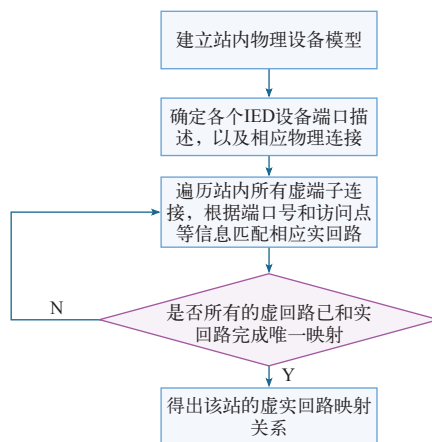


图2 虚实回路映射模型建立流程

4 基于故障影响域和预想集故障诊断

4.1 故障诊断原理

当变电站物理链路发生故障时，由于发生故障的元件不同，其影响的范围也不同，由此带来的链路告警的多少及内容也会产生差异。因此，以每个故障元件的故障影响域为基础，通过分析实际的链路告警，得出预想故障集，在预想故障集中搜索链路告警与实际告警概率最大项，从而确定故障环节。

4.2 故障元件影响域

本文将故障元件分为三个层面：光纤故障、板卡故障和设备故障。光纤故障影响域为通过该光纤的所有虚回路信息

$$D_c = \sum_{j=1}^n f(i_j), \quad i_j \in F(\text{cable}) \quad (1)$$

板卡故障影响域为所有通过此板卡的虚回路信息

$$D_b = \sum_{j=1}^n f(i_j), \quad i_j \in F(\text{board}) \quad (2)$$

设备则为所有通过该设备的虚回路信息

$$D_d = \sum_{j=1}^n f(i_j), \quad i_j \in F(\text{device}) \quad (3)$$

式中， D_c 、 D_b 和 D_d 分别为三种元件故障影响域或者为由于该元件故障产生告警的集合； i_j 为造成该告警的故障原因； $F(\text{cable})$ 、 $F(\text{board})$ 和 $F(\text{device})$ 则分别为光纤、板卡和设备故障元件集合。

三种故障元件影响范围不同，按照单元件故障影响域的大小排序

$$D_c < D_b < D_d \quad (4)$$

4.3 预想故障集划分

当某个 T 时刻，监控后台出现链路告警时，根据上述的各个故障元件的影响域确定预想故障集：预想故障集范围由故障中心和故障半径来确定，即

$$D_f = (O_f, R_f) \quad (5)$$

式中， O_f 为故障中心； R_f 为故障半径。

1) 故障中心的确定。由于检测装置都是设置在接收端，因此告警信息也往往以接收端所接收

的信息为依据，当接收端发生告警时，则将该设备视为故障中心。

2) 故障半径的确定。故障半径是指和故障中心连接的故障层面，本文依据上述故障影响的范围将故障分为两个层面

$$R_f = \begin{cases} 1 & \text{表示到与之相连的光纤层} \\ 2 & \text{表示到与之相连的板卡及设备层} \end{cases} \quad (6)$$

R_f 的划分根据链路告警信息的数量及三种故障元件的故障影响域进行划分，当出现少数单链路的告警信息时划分到光纤层，即 $R_f=1$ ；若出现大量链路告警及IED设备告警则划分到与之相连的交换机层面，即 $R_f=2$ 。

实际情况中链路告警信息往往不止一条，告警设备也不止一台，因此要进行多个预想故障集的划分，即

$$D_f = \{D_{f1}, D_{f2}, \dots, D_{fm}\} \quad (7)$$

故障预想集划分示意图如图3所示。

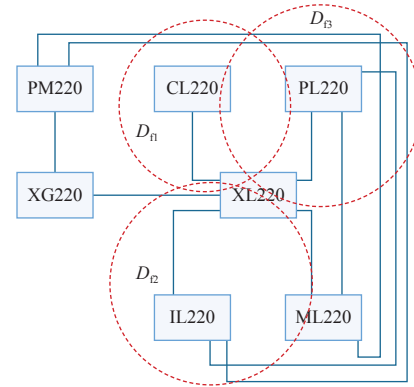


图3 故障预想集划分示意

4.4 预想故障集判定

按照上述建立了预想故障集之后，就可以通过建立的虚实回路映射模型得出所有的告警信息，本文通过引入故障概率和故障影响域准确度两个指标进行故障集的评判。定义

$$\begin{cases} N_0 = \sum_{i=1}^n a_i \\ N_a = \sum_{j=1}^n a_j \\ N_c = \sum_{i=1}^n (a_i \cap a_j) \end{cases} \quad (8)$$

式中, N_0 为监控真实告警数量; N_a 为预想故障集故障元素的告警数量; N_c 为预想故障告警和真实告警相同的数量; a_i 、 a_j 为系统告警项, 两者做与运算, 相同则为1, 否则为0。

预想故障故障概率的计算公式为

$$P_1 = \left[1 - \frac{(N_0 - N_c)}{N_0} \right] \times 100\% \quad (9)$$

由于设定不同的故障元素会出现所得的告警数量相同, 因此需要根据设定元素总的告警数量来进一步缩小故障环节, 引入影响域准确度指标, 其公式为

$$P_2 = \left[1 - \frac{(N_a - N_c)}{N_a} \right] \times 100\% \quad (10)$$

当 P_1 相同时, P_2 值越大说明故障匹配度越高, 定位越准确。

若为多个故障子集, 则先计算每个子集中概率值最大的故障集, 然后将这些故障集再重新组合新故障元素进行计算, 直到得出最终概率最大的故障集合。

4.5 故障定位流程

1) 步骤一。首先根据监控后台告警信息判断是链路软故障还是链路硬故障, 若为软故障则重新配置两端智能电子设备交互信息, 否则转入步骤二。

2) 步骤二。以接收端设备的告警信息为依据, 形成告警信息判据, 根据4.3节所述和式(7)建立预想故障集 D_f , 该故障集包含多个故障子集 $D_{f1} \cdots D_{fn}$ 。

3) 步骤三。按照式(9)计算故障子集中的每一个故障元素 a_n 的故障概率 P_{1n} , 按照故障概率排序, 选出故障概率最大的故障元素 $a_n = \max(P_1)$; 如果出现故障概率相同元素根据式(10)计算准确度指标, 找出准确度最大的故障元素, $a_n = \max(P_1) \cap \max(P_2)$ 。

4) 步骤四。将所有子集找出的最大故障元素再组成新的故障集 $D'_f = \{a', a'_2, \cdots, a'_n\}$, 重复步骤4)直到找到最后的故障元素, 即完成故障环节的定位。基于故障影响域和预想集诊断流程如图4所示。

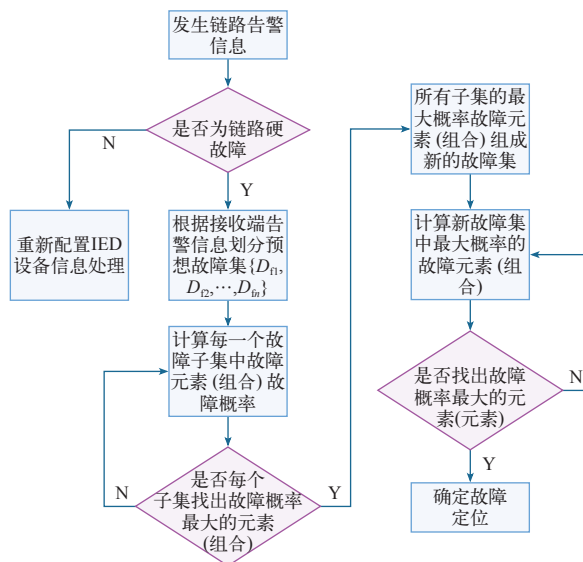


图4 基于故障影响域和预想集诊断流程

5 算例分析

如图5所示, 以某变电站220 kV过程层间隔为

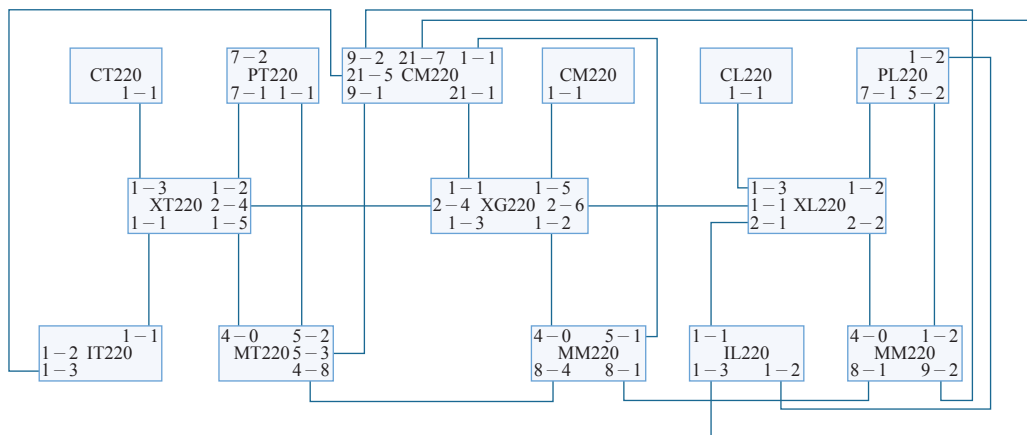


图5 某站220 kV过程层设备连接图

示例,其中包含了线路间隔、主变压器高压侧间隔、母线间隔以及两台间隔交换机和一台中心交换机共14台设备。每一台装置端口按照实际的端口需求来配置,先对三台交换机进行IEC 61850建模,创建其连接端口,按照实际的光纤连接配置各个IED设备的端口连接,形成图3所示的物理连接示意图,共计26个板卡、48个端口。

表2显示了过程层告警信息,其中出现报警的接收端IED设备有三个,分别为IL220、CL220和ML220,按照上面所述的方法以这三个IED设备为故障中心分别建立预想故障集,其中故障半径 R_f 取2; $D_f = \{D_{f1}, D_{f2}, D_{f3}\}$; 以 a_1 、 a_2 和 a_3 来表示其中的故障元素,具体如表3所示。计算所划分的预想故障集中的每个故障元素的故障概率,具体结果如表4所示。

表2 过程层链路报警信息

序号	事件分组	对象	事件描述
1	GOOSE	Ox0102-IL220	超时
2	GOOSE	Ox0102-IL220	通信中断
3	GOOSE	Ox0302-IL220	通信中断
4	GOOSE	Ox0127-CL220	通信中断
5	GOOSE	Ox0227-CL220	通信中断
6	GOOSE	Ox0327-CL220	通信中断
7	GOOSE	Ox0427-CL220	通信中断
8	GOOSE	Ox0137-CL220	通信中断
9	SV	Ox0432-CL220	采样无效
10	SV	Ox0432-CL220	品质改变
11	SV	Ox0127-ML220	采样无效
12	GOOSE	Ox0127-CL220	通信中断

表3 建立预想故障集

故障元素	a_1	a_2	a_3
故障集			
D_{f1} (IL220)	IL220到XL220 光纤故障	IL220板卡1故障	XL220板卡2故障
D_{f2} (CL220)	CL220到XL220 光纤故障	XL220板卡1故障	
D_{f3} (ML220)	ML220到XL220 光纤故障	ML220板卡4故障	XL220板卡2故障

由表3可以看出故障元素 a_2 、 a_3 故障概率最大,但故障元素 a_3 的影响域准确度更高,因此预想故障集中 a_3 为最可能的故障环节。

表4 D_{f1} (IL220) 故障集各元素故障概率

	a_1	a_2	a_3
总告警数量 (N_e)	10	14	10
相同告警数量 (N_c)	8	10	10
故障概率 (P_1)	0.67	0.83	0.83
影响域准确度 (P_2)	0.8	0.71	1

由同样的方法可得出预想故障集 D_{f2} (CL220) 中 a_1 为最可能的故障环节, D_{f3} (ML220) 中 a_3 为最可能的故障环节。

将上述中得出的三个预想故障集中的故障元素划分,得出新的故障集为 $D_f = \{\text{IL220到XL220光纤(端口)故障, XL220板卡2故障}\}$,比较上述两个故障元素的故障概率则得出“XL220板卡2故障”概率最大,因此可以确定该物理链路的故障为XL220板卡2故障。

6 结束语

本文通过建立变电站物理链路网络节点模型,提出了一种链路告警的综合分析方法,并通过算例验证了该方法的有效性,对实际的工程应用具有很好的指导意义。

参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW—2013 智能变电站二次系统信息模型校验规范[S].
- [2] 国家电网公司. Q/GDW 396—2009 IEC61850工程继电保护应用模型[S].
- [3] 高磊,卜强生,袁宇波,等. 基于二次回路比对的智能变电站调试及安全措施[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 130-134.
- [4] 潘华君,许晓峰,许东,等. 基于模糊评判法的智能变电站二次系统状态评估[J]. 沈阳工程学院学报, 2014, 10(2): 143-147.
- [5] 鲍凯鹏,谢刚文,曾治安. 智能变电站二次回路在线监测研究[J]. 智能电网, 2014, 2(5): 23-27.
- [6] 文继锋,盛海华,周强,等. 智能变电站继电保护在线监测系统设计与应用[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1): 21-29.

(下转第41页)

- 社, 2012.
- [3] User's manual of SF-Auto.CSC101 distance protection [S].
- [4] M Eissa. Ground distance relay compensation based on fault resistance calculation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1830-1835.
- [5] Ha Hengxu, Zhang Baohui. Study on reactance relays for single phase to earth fault on EHV transmission lines [C]. 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004: 1-5.
- [6] 贺家李, 李永丽, 郭征, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (23): 1-6.
- [7] Xu Z Y, Huang S F, Ran Li, et al. A distance relay for a 1000-kV UHV transmission line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (3): 1-9.
- [8] 李斌, 贺家李, 常文华, 等. 基于贝瑞隆模型的长线路距离保护 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (23): 52-56.
- [9] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 零序电抗继电器在特高压交流输电线路上的适用性分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (4): 46-50.
- [10] 张洋, 王伟, 樊占峰. 基于虚拟零序电流的双回线接地距离保护原理 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (21): 55-59.
- [11] 夏勇军, 尹项根, 胡刚, 等. 同杆双回线路继电保护原理及工程应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (3): 98-103.
- [12] 马静, 曾惠敏, 林富洪. 一种基于分布参数模型的线路相间距离保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (4): 32-36.
- [13] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7): 264-270, 255.
- [14] 刘青, 王增平, 张媛. 基于改进Hilbert谱分析的STATCOM并补线路保护方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (11): 202-209.
- [15] 汪旻, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 176-179.
- [16] 蒋科, 吕飞鹏, 郭亮, 等. 基于感受阻抗的相间距离保护整定计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 129-133.
- [17] 陈新, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于多代理技术的智能电网继电保护在线整定系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (18): 167-173.

(收稿日期: 2016-12-13) **EA**

(上接第29页)

- [7] 肖小兵, 王宇恩. 基于网络报文数据的电网故障诊断分析 [J]. 华东电力, 2014, 42 (12): 73-75.
- [8] 黄华茂, 张程, 李垂有, 等. 数字化变电站GOOSE链路状态监测方法探讨 [J]. 广东电力, 2014, 27 (12): 76-79.
- [9] 李忠安, 王娇, 张惠刚, 等. IEC 61850过程层网络通信分析诊断工具设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (1): 93-97.
- [10] 曹海欧, 高翔, 杨毅, 等. 基于全模型SCD二次系统在线监测及智能诊断应用分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (14): 136-141.
- [11] 李响, 李彦, 刘革明. 光纤纵联保护通道故障在线诊断方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (2): 147-150.
- [12] 国家电网公司. Q/GDW 11361—2014 智能变电站保护设备在线监视与诊断技术规范 [S].

(收稿日期: 2016-02-10) **EA**