

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.23.014

基于三态数据的电网在线综合故障诊断

闪 鑫¹, 赵家庆², 张 剑¹, 李 维³, 钱江峰¹, 唐涛南⁴

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061; 2. 苏州供电公司, 江苏省苏州市 215004;
3. 华东电网有限公司, 上海市 200002; 4. 北京市电力公司, 北京市 100031)

摘要: 提出了一种基于三态(稳态、动态、暂态)数据的电网在线综合故障诊断方法。首先从数据特性和调度自动化现状出发, 分析了利用三态数据进行在线故障诊断的必要性; 其次, 从在线故障诊断的正确性、实时性和全面性 3 方面入手, 提出了多源信息的数据挖掘和协同处理技术; 最后, 展望了电网在线故障诊断未来的发展方向。

关键词: 在线故障诊断; 三态数据; 数据挖掘; 调度自动化

0 引言

智能电网是世界电力行业发展的趋势, 国内外都给予了极大的关注^[1]。智能电网应具备自我感知、自我诊断、自我预防、自我愈合的大电网智能运行控制能力。自我诊断是指在电网发生故障时, 能够自动、快速诊断电网中的故障设备, 辅助调度运行人员处理故障, 防止故障范围进一步扩大。

电网在线故障诊断是国内外的研究热点。受限于调度自动化技术水平, 传统在线故障诊断通常基于单一数据源(例如开关变位或故障录波数据等), 电网在线故障诊断在正确性、实时性以及分析结果全面性 3 个方面难以达到较好的平衡, 以致未能在调度中心得以实用。

近年来, 随着计算机通信技术在调度自动化领域的广泛应用, 调度自动化系统逐渐形成了综合数据信息平台, 实现了对电网三态(稳态、动态、暂态)数据的综合采集、存储和统一访问, 为研究和实施基于三态数据的在线综合故障诊断提供了技术保障。

三态数据的不同特性决定了其应用于在线故障诊断时具有不同的效果。

电网稳态数据基于远程终端单元(RTU)采集。其特点为采集频率低、上送速度快、布点全, 主要包括遥信变位、保护动作信号、事件顺序记录(SOE)动作信号和厂站事故总信号等信息。利用其进行在线故障诊断具有实时性好、监视范围全面的优点, 但其采集频率低的特点决定了难以对故障进行精细化分析, 只能得到故障的概要信息^[2-7]。

电网动态数据是基于相量测量单元(PMU)采

集的相量数据。其特点为采集频率较高(一般不低于 25 帧/s)、上送速度快且具有精确的全球定位系统(GPS)对时, 主要包括电压、电流的三相幅值和相角。利用其进行在线故障诊断不仅实时性较好, 同时由于其采样频率较高, 在故障信息精细化分析方面略强于稳态数据, 但是其布点不全, 使得在故障监视范围上存在盲区^[8-9]。

电网暂态数据主要是通过故障录波器采集的电压、电流原始波形数据, 采样频率很高, 完整、详细地描述了电网故障全过程, 可以对故障进行精细化分析, 是故障分析最宝贵的数据源。但是故障录波数据上送速度较慢、稳定性较差, 而且由于故障录波器型号差异、设备老旧等原因, 使得调度中心侧难以实现对所有故障录波器接入, 在故障监视范围内也存在盲点^[10-11]。

因此, 找到一种综合上述三态数据所有优点的在线故障诊断算法, 是目前亟需解决的难题。

针对上述问题, 本文基于电网三态数据, 结合数据源的不同特性, 对数据深入挖掘与分析, 从正确性、实时性和全面性 3 方面入手, 提高在线故障诊断的实用化水平, 辅助调度运行人员进行故障处理。

1 数据分析

1.1 故障机理

电力系统故障诊断以反映电力系统故障信息为基础。如图 1 所示, 电力系统发生短路故障后, 由于故障设备短路点被短接, 故障设备的电压降低, 从而导致电流增加, 即故障设备电压、电流发生突变。继电保护装置监测到故障设备的电流电压突变后, 进行分析判断, 当判断为保护装置保护范围内的设备故障后, 则向对应的断路器发出跳闸信号, 断路器状

态由合位转变为分位,至此故障设备从电网中隔离出来,故障消除。电网短路故障可划分为3个时间段,分别为故障状态中电气量的变化、保护装置动作和断路器变位3个过程。

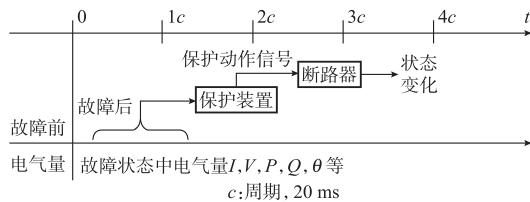


图 1 短路故障特征信息

Fig. 1 Short circuit characteristic information

1.2 数据特性

电网短路故障特征信息包括稳态数据的开关变位、保护动作信号、SOE 动作信号和厂站事故总信号等,动态数据的电压、电流突变以及暂态数据的电压、电流突变。由于数据源的不同特性,导致分析结果在时间、空间和对象维度均存在差异。

电网故障数据源特性如表 1 所示。

表 1 数据源特性
Table 1 Data source properties

数据类型	时间维	空间维	对象维					
			故障设备	故障时间	故障相别	重合类型	短路电流	故障测距
稳态数据	秒级	完全可观测	✓	✓	粗略判别	✓	✗	✗
动态数据	秒级	部分可观测	✓	✓	✓	✓	✗	✗
暂态数据	数分钟	部分可观测	✓	✓	✓	✓	✓	✓

注: ✓ 表示具有该功能; ✗ 表示不具有该功能。

首先,从时间维角度分析,电网发生故障后,稳态数据和动态数据在秒级时间内即可上送,而暂态数据需要数分钟甚至更长时间才能上送。因此,利用稳态和动态数据进行在线故障诊断,可以满足调度故障感知的实时性要求。

其次,从空间维角度来看,PMU 布点不全,具备绝大部分可观测性,故障录波器虽已完全布点,但只有部分故障录波器实现了与调度中心侧的联网和自动上传功能,因此在调度中心侧也只具备部分可观测性,只有稳态数据布点全且全部实时上送。因此,利用稳态数据进行在线故障诊断,可以实现对故障范围的全监视。

最后,从对象维角度来看,稳态数据采样率低,绝大多数情况下只能利用状态量进行判断。因此,对故障信息的分析只能局限于故障设备、故障时间、重合类型以及故障相的判别,且受限于保护故障跳

闸方式,也只能粗略判别故障相。动态数据采样率较高且具有分相电压、电流信息,在稳态数据的基础上可以实现故障相别的精确判断,且较少受误遥信的干扰,故障诊断准确率也较高。暂态数据采样频率很高,在前两者信息的基础上可以进一步进行故障实测短路电流计算以及故障测距等功能,可以满足调度对故障信息全面性的要求。

1.3 现状分析

虽然目前绝大多数调度中心都已实现了三态数据的采集,但数据不稳定、可靠性有待提高是共性问题,也是导致在线故障诊断实用化程度一直不高的最关键因素之一。以往专家和学者提出了各种故障诊断算法,其正确性前提均是数据可靠性高,但是在实际电网运行环境中,运行效果不甚理想,因为电网实际故障时的数据与理想情况下的数据是有差别的。导致这种差别的原因有以下 2 个方面。

1) 数据本身不可靠。主要体现在电网故障时存在数据丢失、上送速度慢以及电网正常运行时存在误遥信等情况。以往故障诊断通过人工分析,调度中心通过综合多方面的信息实现对上述坏数据的辨识,而目前在线故障诊断是通过计算机自动分析完成的。若不能实现调度对上述坏数据的辨识功能,就容易出现故障的漏判和误判,从而降低在线故障诊断的正确率,使得在线故障诊断功能失去可信度。

2) 接入方式对数据可靠性的影响。最为典型的是保护动作信号的接入。保护信号接入分为 2 种方式,即硬结点接入和软报文接入。硬结点接入是通过 IEC 60870-5-104 远动设备与系统传输协议接入保护动作信号的硬结点状态,具有数据可靠性高、上送速度快的特点,但是只适合将子站端关键性的保护动作信号或多个保护信号合并后接入,否则人工维护和通信压力都很大。软报文接入是通过 IEC 60870-5-103 继电保护设备信息接口配套标准传输协议实现对保护信息子站信号的接入,具有模型自动维护、保护动作信号全的特点,但是目前保护信息子站可用率低,导致该种接入方式的保护动作信号可靠性要大大低于硬接点接入方式。

因此,在线故障诊断在算法设计过程中需要充分考虑电网数据现状,综合运用调度端的多源信息进行分析,以减小数据可靠性不高对在线故障诊断正确率的影响。

2 算法实现

正确性、实时性和全面性是考核在线故障诊断是否能够满足调度实用化要求的 3 个基本指标。正确性指在电网真正发生故障时不漏报,在电网正常

运行时不误报;实时性指在电网发生故障后能够快速发出告警信息,使得调度在第一时间感知电网故障;全面性指故障分析结果尽可能全面反映故障各类特征信息,例如故障设备、故障相别、重合情况、短路电流以及故障测距等。

因此,本文主要从以上3个指标开展研究,提高在线故障诊断的实用化水平。

2.1 故障特征信息的深度挖掘

正确率不高一直是电网在线故障诊断难以满足实用化的原因之一。以往,由于数据源的局限性,在线故障诊断基本上是采用单一数据源,使得在线故障诊断的正确率与故障时上送数据的准确性和实时性具有很大关系。而调度自动化系统由于建设周期不同,每个厂站的自动化水平也参差不齐,因此,数据的准确性和实时性很难保证都达到较高的水平。数据丢失、上送速度慢、GPS对时不准以及误遥信等现象屡见不鲜,使得在线故障诊断存在较多的漏判和误判,难以满足调度中心对故障判断正确率的要求。

解决在线故障诊断正确率低的方法之一是综合利用调度端的各类数据,深度挖掘短路故障的特征信息,利用信息的冗余度,实现信息的校验与补充,提高在线故障诊断的正确率。

电网故障时涉及状态量和电气量两者共同的变化。状态量的变化主要来自于稳态数据,包括遥信变位信号、SOE动作信号、保护动作信号以及事故总告警信号等;电气量的变化主要来自于动态数据和暂态数据,包括电压、电流的突变。状态量和电气量来源于不同的量测装置,因此,综合利用它们进行故障判断,有利于实现故障诊断信息的补充和校验,以解决在线故障诊断的漏判和误判。为此,可以采取下列技术。

1) 数据丢失处理技术。传统在线故障诊断方法大多采用网络拓扑分析的方法得到故障设备。在进行网络拓扑分析时,往往需要获取故障设备所有的开关变位信息,而在电网实际故障中经常出现故障设备一侧开关变位信息丢失或上送速度较慢,从而导致无法定位故障设备。引入多源信息后,保护动作信号、厂站事故总告警信号以及电压电流突变等故障特征信息作为电网发生故障的标志,利用故障设备一侧的开关变位信息进行网络拓扑分析,得到单端开断的设备,定位故障设备。通过上述处理,可以克服数据丢失或上送速度过慢导致故障漏判的问题。

2) 数据校验技术。新厂站或新设备投运后开关、保护联动试验的遥信变位和开关结点抖动、通信异常等引起的误遥信是造成电网在线故障诊断经常

出现误判的2个重要因素。解决上述问题的根本途径是引入电气量信息,作为状态量故障判断的校验,从电网故障机理分析可知,电网故障时电压突然降低、电流突然增大,利用PMU实测的三相电压、电流数据,采用模式匹配的方法,其计算公式如下:

$$\Delta U = U_\varphi - U_{\varphi|0} \quad (1)$$

$$\Delta I = I_\varphi - I_{\varphi|0} \quad (2)$$

式中: ΔU 为故障时电压突变量; U_φ 为故障后电压相量幅值; $U_{\varphi|0}$ 为故障前电压相量幅值; ΔI 为故障时电流突变量; I_φ 为故障后电流相量幅值; $I_{\varphi|0}$ 为故障前电流相量幅值。

当电压、电流突变量满足设定的限值时,即可认为电网发生短路扰动。将该信息作为上述状态量判断的校验,可克服由此造成的故障误判弊端。

2.2 快速诊断和详细分析的兼顾

实时性和全面性是衡量在线故障诊断实用化程度的另外2个重要指标。传统在线故障诊断未能很好地协调上述两者之间的关系,在提高实时性的同时却牺牲了全面性,在保证全面性的同时又降低了实时性,因此与调度事故处理的实际需求尚存差距。

解决上述问题需要从调度事故处理的需求和数据源的不同特性2方面入手。

首先,从调度事故处理流程来看,调度中心对故障信息的需求分为2个时间阶段,如图2所示。第1阶段是故障辨识阶段,即电网发生故障后,调度中心需要第一时间掌握电网是否发生故障、故障设备、重合情况以及故障相别等概要信息。这个阶段的分析结果越快越好,以便调度中心快速感知电网故障并进行故障初步处理。第2阶段是故障处理阶段,调度中心需要进一步了解短路电流和故障测距等信息,以便优化线路送电端选择和提高线路巡线效率。这个阶段往往在故障后发生的数分钟或数十分钟、甚至更长时间,对实时性的要求要远低于故障辨识阶段。

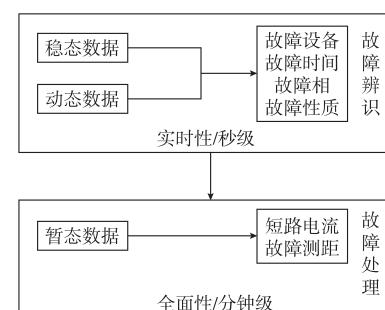


图2 调度事故处理流程
Fig. 2 Dispatcher fault handling flow

其次,从数据源的特性出发,稳态和动态数据在故障后秒级时间范围内即可上送调度中心,利用其

可以得到故障辨识阶段的所有信息。暂态数据在故障后数分钟内可以上送调度中心,利用其可以得到故障处理阶段的所有信息。因此,综合利用稳态、动态和暂态数据进行分析即可满足调度事故处理实时性和全面性的要求。

具体实施步骤如图3所示。首先利用稳态和动态数据进行故障的初步判断,得到故障概要信息,并输出给故障诊断综合处理模块,这时故障诊断综合处理模块发出电网故障告警信息。然后利用暂态数据得到故障详细信息,并输出给故障诊断综合处理模块,故障诊断综合处理模块以故障设备和故障时间为索引,将不同数据源分析得到的信息进行整合,形成完整的故障事件信息,从而兼顾故障诊断实时性和全面性。

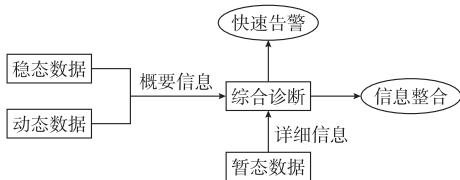


图3 故障诊断综合分析逻辑框图
Fig. 3 Logic diagram of fault diagnosis comprehensive analysis

3 工程应用

本文研究成果已应用于智能电网调度技术支持系统的多个试点工程和华东电网高级调度中心^[12-13],并通过了华东电力试验研究院的实时数字仿真(RTDS)试验。变电站监控系统从传统的简单监控功能升级到高级应用分析功能,在线故障诊断方法运用到变电站侧,变电站侧通过分析将故障概要信息上送到调度中心,调度中心则根据各个厂站的故障简报综合分析得到故障信息,即实现了变电站、调度中心的两级分布式在线故障诊断。充分利用变电站侧的各类信息,诊断的准确率可以进一步提高,通过变电站的预分析实现关键信息的上送,减轻了调度中心侧数据接入量的压力。

在2010年的世博会保电期间,在线辨识华东电网设备故障共40余起,正确率高达95%以上。

目前已经在华东电网有限公司开展了分布式在线故障诊断的研究和工程实施工作,在数据通信协议、主子站模型共享、子站侧在线故障诊断等方面取得了显著的成果。下一步研究的重点是制定适应于分布式故障诊断的主站侧功能规范。

参 考 文 献

[1] 姚建国,严胜,杨胜春,等.中国特色智能调度的实践与展望[J].

电力系统自动化,2009,33(17):16-20.

YAO Jianguo, YAN Sheng, YANG Shengchun, et al. Practice and prospects of intelligent dispatch with Chinese characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 16-20.

[2] 毕天姝,倪以信,杨奇逊.人工智能技术在输电网络故障诊断中的应用述评[J].电力系统自动化,2000,24(2):11-16.

BI Tianshu, NI Yixin, YANG Qixun. An evaluation of artificial intelligent technologies for fault diagnosis in power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 11-16.

[3] 文福拴,韩祯祥.基于覆盖集理论和Tabu搜索方法的电力系统警报处理[J].电力系统自动化,1997,21(2):18-23.

WEN Fushuan, HAN Zhenxiang. A new approach to alarm processing in power system based upon the set covering theory and Tabu search method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 18-23.

[4] 文福拴,韩祯祥.基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统故障诊断[J].中国电机工程学报,1994,14(3):29-35.

WEN Fushuan, HAN Zhenxiang. Fault section estimation in power systems using genetic algorithm and simulated annealing [J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 29-35.

[5] 汤磊,孙宏斌,张伯明,等.基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J].中国电机工程学报,2003,23(7):5-11.

TANG Lei, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Online fault diagnosis for power system based on information theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 5-11.

[6] 周明,任建文,李庚银,等.基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统[J].电力系统自动化,2001,25(24):33-36.

ZHOU Ming, REN Jianwen, LI Gengyin, et al. Distributed power system fault diagnosis expert system based on fuzzy inference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 33-36.

[7] 陈玉林,陈允平,孙金莉,等.电网故障诊断方法综述[J].中国电力,2006,39(5):27-31.

CHEN Yulin, CHEN Yunping, SUN Jinli, et al. A survey of power system fault diagnosis[J]. Electric Power, 2006, 39(5): 27-31.

[8] 曹路,张涛,汪德星,等.华东电网WAMAP系统的应用实践[J].电力系统自动化,2008,32(21):97-100.

CAO Lu, ZHANG Tao, WANG Dexing, et al. Application of wide area monitoring analysis protection and control system in east China power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 97-100.

[9] 宋晓娜,毕天姝,吴京涛,等.基于WAMS的电网扰动识别方法[J].电力系统自动化,2006,30(5):24-28.

SONG Xiaona, BI Tianshu, WU Jingtao, et al. Study on WAMS based power system disturbance identifying method[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2006, 30(5): 24-28.

[10] 赵爽,任建文.电网故障诊断系统的一种设计与实现[J].华东电力,2003,31(11):19-21.

ZHAO Shuang, REN Jianwen. Design and realization of a fault diagnosis system for electric power system [J]. East China Electric Power, 2003, 31(11): 19-21.

(下转第119页 continued on page 119)

[11] 赵爽,任建文,周明. 分层式电网故障诊断系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):65-68.

ZHAO Shuang, REN Jianwen, ZHOU Ming. Design and realization of a delaminated fault diagnosis for power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 65-68.

[12] 王毅. 智能电网故障辨识系统设计研究[J]. 华东电力,2009, 37(6):20-25.

WANG Yi. Research and design of the fault diagnosis system of the smart grid[J]. East China Electric Power, 2009, 37(6): 20-25.

[13] 帅军庆. 特大型电网高级调度中心关键技术[M]. 北京:中国电

力出版社,2010.

闪 鑫(1980—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:广域测量系统及综合智能报警应用。E-mail: shanxin@sgepri.sgcc.com.cn

赵家庆(1963—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化的研究开发、建设运行和技术管理。E-mail: jqzhao1963@163.com

张 剑(1978—),男,工程师,主要研究方向:电网调度自动化。

On-line Comprehensive Fault Diagnosis of Power Grid Based on Three-state Data

SHAN Xin¹, ZHAO Jiaqing², ZHANG Jian¹, LI Wei³, QIAN Jiangfeng¹, TANG Taonan⁴

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;

2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

3. East China Grid Co. Ltd., Shanghai 200002, China; 4. Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: An on-line integrated fault diagnosis method of power grid based on three-state (steady, dynamic and transient state) data is proposed. Firstly, proceeding from the data characteristic and the status quo of dispatch automation, an analysis is made of the necessity of on-line fault diagnosis using the three state data. Secondly, starting from the aspects of accuracy, real-time, comprehensiveness of on-line fault diagnosis, a technology of data mining and co-processing based on multi-source information is proposed. Lastly, a look-ahead of the future developing direction in the field of on-line fault diagnosis is given.

Key words: on-line fault diagnosis; three state data; data mining; dispatch automation