

基于物联网技术的变电站故障录波分析系统设计与应用

沈秀兵

(上海泽鑫电力科技股份有限公司, 上海 201206)

摘要: 针对变电站智能运维以及故障在线监视的问题, 提出了基于物联网架构的变电站故障录波分析系统。分析了智能变电站的基本网络结构, 介绍了物联网框架以及物联网监测机制。针对故障录波分析系统提出了系统架构, 分析了系统功能、波形采样时间以及录波文件形式等。基于该系统的应用提出了双端测距方法, 利用故障录波文件实现故障测距。最后以双端测距为例, 说明了所提系统的有效性。

关键词: 物联网; 变电站录波; 智能变电站; 双端测距

Design and application of substation fault recording and analysis system based on IoT technology

SHEN Xiubing

(Shanghai Zexin Power Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Aiming at the problems of substation intelligent operation and maintenance and fault online monitoring, a substation fault recording and analysis system based on the Internet of Things architecture is proposed. The basic network structure of the smart substation is analyzed, and the framework of the Internet of Things and the monitoring mechanism of the Internet of Things are proposed. Aiming at the fault recording analysis system in this paper, the system architecture is proposed, and the system function, waveform sampling time and recording file form are analyzed. Based on the application of this system, a double-terminal distance measurement method is proposed, and fault distance measurement is realized by using fault recording files. Finally, the effectiveness of the system in this paper is illustrated by taking the double-ended data as an example.

Key words: IoT; substation wave recording; smart substation; double-terminal ranging

0 引言

故障录波装置是监视电力系统元件正常运行的一种状态记录装置, 系统正常运行时, 故障录波装置不启动; 当系统发生元件故障等异常情况时, 故障录波装置启动, 对故障原因、故障信息以及保护安全自动装置的动作进行记录。记录的信息以文件的形式存储, 从而方便继电保护和运行人员对故障进行分析。同时故障录波记录文件

也是寻找事故原因、发现事故位置及快速处理事故的重要依据。

目前针对智能变电站故障录波的应用, 文献[1]提出了基于故障录波主站的实时在线保护评价方法。文献[2]提出了基于故障录波数据的变电站中压系统故障特征分析。文献[3]提出了基于故障录波的直流系统瞬时接地监测系统。文献[4]提出了基于电气相连状态的一二次系统故障

自动区分方法。文献[5]提出了基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径。

可以看出,针对变电站故障录波的研究主要集中在与保护方案的紧密结合上,包括故障录波特征分析以及故障判断方法等。而目前的研究未结合物联网技术,将变电站的多项测控装置有机整合形成故障录波分析系统,为此本文重点分析这一研究内容。

本文提出了基于物联网技术的变电站故障录波分析系统。利用提出的系统对变电站故障进行检测,利用双端测距方法实现故障定位。

1 智能变电站二次系统结构

智能变电站网络结构包括站控层、间隔层和过程层。智能变电站的结构如图1所示。根据 IEC 61850 的标准,间隔布置保护和测控装置,过程层实现对各单元合并终端的信息采集。

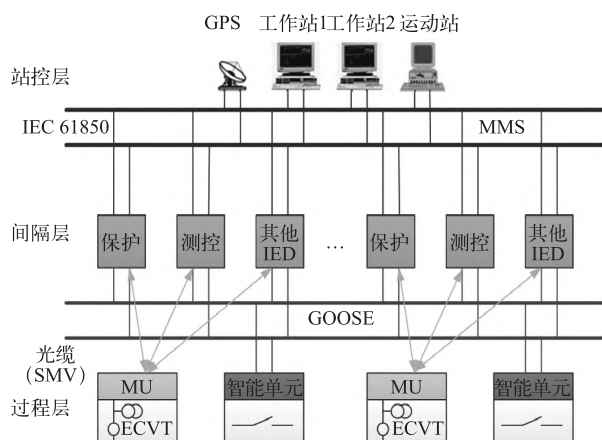


图1 智能变电站体系结构
Fig. 1 Intelligent substation architecture

1) 过程层是针对变电站内部底层信息采集的主要设备,实现终端信息采集和控制。

2) 间隔层主要负责设备保护、测控装置的信息传输。

3) 站控层以自动化系统和通信系统为依托,实现对整个变电站的保护、测控、测量和监视等功能。

智能变电站二次系统主要由保护系统和测控系统组成,具体结构如图2所示。分为保护A网、保护B网和测控系统。其中保护A网主要负

责主变压器保护、各电压等级的线路保护和母线保护。保护A网能够实现不同电压等级对全站主要设备的保护功能。

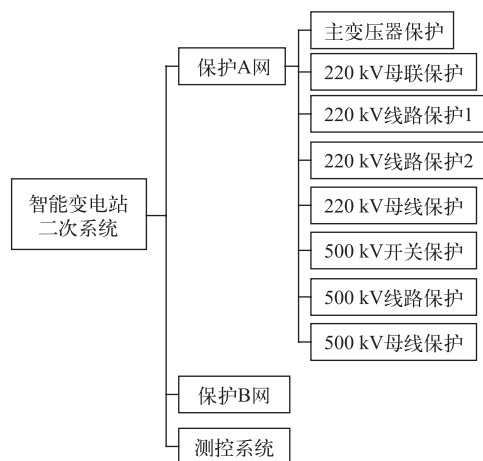


图2 智能变电站二次系统结构

Fig. 2 Secondary system structure of intelligent substation

2 变电站故障录波特征分析系统设计

2.1 物联网监测系统

物联网技术是实现智能变电站安全运行管理的应用系统,能够通过采集海量大数据实现高级应用和数据分析。主要针对变电站二次保护以及全站范围内设备运行安全的视频监控系统、机器人巡检系统和常规辅助控制系统等。针对变电站主要的运行管理之间应用场景相对独立的特点,物联网技术能够以数据共享、信息交互、智能决策和其他高级应用形成综合管理平台,对变电站主要的二次设备实现在线监视与分析,并为二次系统的保护控制提供决策依据。

变电站内物联网支撑的数据体系主要包括数据存储、数据计算、控制与应用等部分。具体示意图如图3所示。

本文提出的物联网监测系统主要针对变电站二次设备以及变电站故障录波系统的监视和管理。通过在线数据监测模块、SCADA数据测量模块、环境数据监测模块、视频数据监测模块和机器人巡检模块,共同构成物联网全景监测系统。将上述功能模块的数据打包发送至SMP接口服务器,最终将上述内容上传至综合应用分析平

台,实现对变电站主要设备的物联网监测。所提出的物联网监测系统能够有效提升变电站内故障录波系统与保护信息融合系统之间的关联性,促进变电站故障录波特征分析系统的高级应用。物联网监测系统如图4所示。

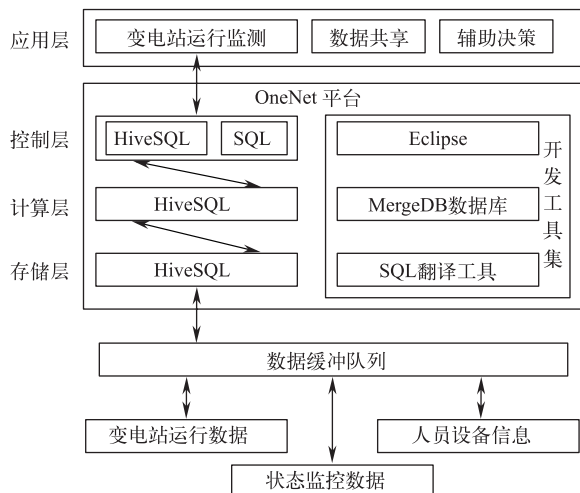


图3 物联网技术应用构架

Fig. 3 Application architecture of internet of things technology

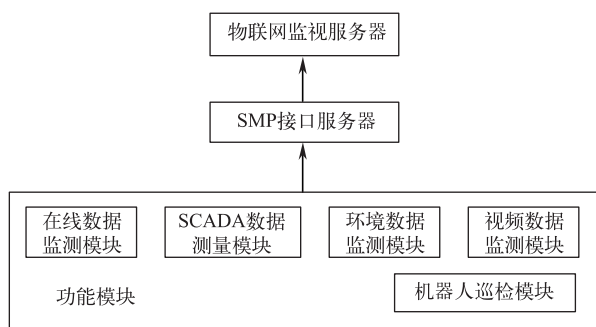


图4 物联网监测系统

Fig. 4 IoT monitoring system

2.2 系统架构

故障录波特征分析系统主要针对故障数据收集和故障数据分析,将元件参数表、保护配置表等基础参数统一整合形成静态数据库。将变电站内主要设备正常运行状态下的微机保护装置参数信息以及故障录波信息形成实时显示的数据预处理,从而进一步构成实时数据库。根据实时数据库,随着时间的推移形成历史数据库,可以提供事件的查询和统计分析功能。实时数据库的故障录波分析系统主要包括波形分析、故障诊断、

保护和开关动作评价等内容,将上述内容形成故障分析报告,将满足发送要求的故障分析报告以数据传输的形式上传至主站数据库,与静态数据库、实时数据库和历史数据库进行信息远传,从而完成故障录波系统在本地和远端的数据融合。系统架构如图5所示。

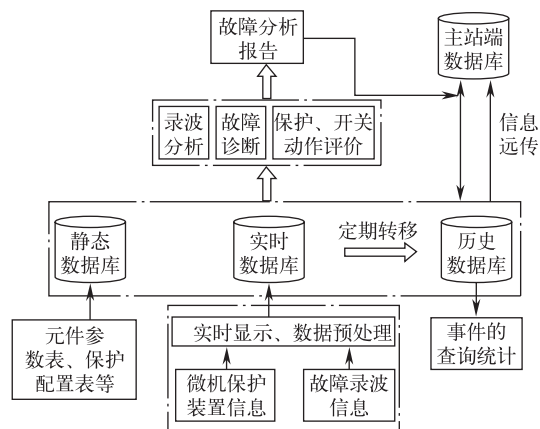


图5 系统架构

Fig. 5 System architecture

系统硬件组成主要包括数据采集单元、数据分析单元和数据管理单元,如图6所示。根据前文所述的故障录波特征分析基本软件框架,将故障录波器采集的内容进行通信传输以及格式转换,形成标准格式数据,从而对波形、保护动作、故障测距和故障原因等内容进行分析。对标准格式的数据进一步管理,细化参数配置、文件传输、文件校对以及其他数据应用管理等内容,满足电力系统对故障录波文件的需求。

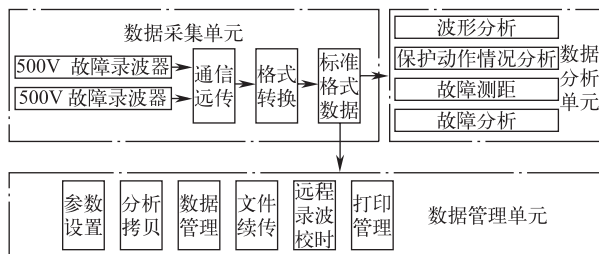


图6 系统硬件组成

Fig. 6 System hardware composition

2.3 系统功能

系统能够根据故障录波和二次保护系统的信息形成主要的故障报告,包括故障的时间、元件

和保护动作情况等。

对子站事件进行信息分类和信息处理，针对产生的保护动作信息进行有效过滤，对相应的元件故障范围和分级进行判断，根据优先级不同，将子站事件进行上送。

生成与本次事故相关的故障录波文件，包括故障设备的电流、电压和开关量变化等，从而形成具备上送条件的简要文件。

能够根据子站的故障录波文件定位需要参与保护动作的装置信息，从而实现信息的快速传送。

2.4 录波采样方式和文件形式

故障录波系统采用分时段采样方式，分为A时段、B时段、C时段和D时段。以每周20点的采样值为记录依据，根据扰动或故障发生的时间进行记录，分为扰动开始前的状态数据和扰动发生后的状态数据，并根据状态后扰动的变化情况分为初期、中期和后期。故障录波时间如图7所示。

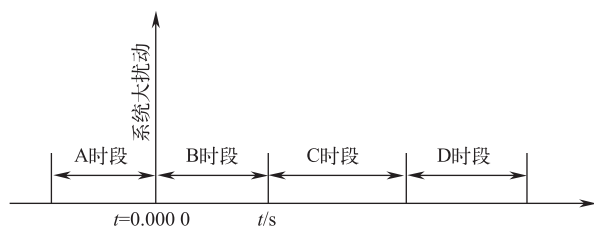


图7 故障录波时间

Fig. 7 Fault recording time

故障录波一般采用COMTRADE数据格式，每个COMTRADE记录都有一组最多四个与其相关的文件，分别为标题文件（xxx.hdr）、配置文件（xxx.cfg）、数据文件（xxx.dat）和信息文件（xxx.inf）。

2.5 录波文件特征分析

针对故障录波文件特征值的提取，采用面向对象思想，兼容处理录波文件的不同COMTRADE标准数据格式，对文件中模拟量通道、开关量通道进行数据建模，利用傅里叶数字滤波算法，分析出厂站、主设备、故障类型、故障电流、故障测距、故障时间和持续时间、保护

动作时序以及正确动作次数等故障特征信息。

3 基于变电站故障录波的双端测距方法

针对目前单端测距与双端测距算法，主要的误差是存在故障过渡电阻。双端测距可以利用双端信息实现对故障条件的判断，无须考虑过渡电阻和系统阻抗对测距的影响，因此在测量准确度上高于单端测距。

为此本文提出基于同步故障录波的双端测距方法，提取线路两侧同一次故障的录波文件，分析录波文件中的故障电压、电流数据，分别计算两侧的保护测量电压，将故障系数、线路单位正序阻抗及线路长度代入测距计算公式，故障点残压两端电压相减而抵消，因此克服了传统阻抗测距的缺陷，测距准确度可精确在3%，实现了故障定位。

图8为单相接地故障等效电路，S和R分别表示电源端及负载端监测点。

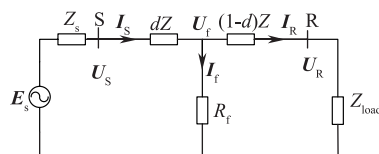


图8 线路故障等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of line fault

图8中， E_s 为电源电压， Z_s 为源阻抗， Z 为线路阻抗， Z_{load} 为负载阻抗。利用标幺值表示线路长度，故障点到S端监测点的距离为 d 。 U_s 、 U_r 分别为S端和R端的对地电压， I_{sa} 、 I_r 分别是S端和R端的电流， U_f 、 I_f 分别表示故障点对地的电压和电流。

设S端电压相量 U_s 和电流相量 I_s 分别为

$$U_s = \begin{pmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{pmatrix}, \quad I_s = \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

R端电压相量 U_r 和电流相量 I_r 分别为

$$U_r = \begin{pmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{pmatrix}, \quad I_r = \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix} \quad (2)$$

S端和R端分别与故障点的相对地电压、电

流关系为

$$KU_f = KU_S - dKZ_{abc}I_S \quad (3)$$

$$KU_f = KU_R + (1-d)KZ_{abc}I_R \quad (4)$$

式中, d 为故障距离; U_f 为故障点的相对地电压。

$$Z_{abc} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, Z_{abc} 为三相线路阻抗矩阵; Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} 为线路的自阻抗; 矩阵其他元素为线路互阻抗, 不计线路互阻抗。

$$K = \begin{pmatrix} k_a & 0 & 0 \\ 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & k_c \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$k_i = \begin{cases} 0 & i \text{ 对应相未出现故障} \\ 1 & i \text{ 对应相出现故障} \end{cases} \quad (i=a,b,c)$$

式中, K 为故障系数矩阵; k_a 、 k_b 、 k_c 分别对应的是a、b、c三相的系数。

根据 k_a 、 k_b 、 k_c 的取值可区别不同的故障类型, 可得

$$KU_S - dKZ_{abc}I_S = KU_R + (1-d)KZ_{abc}I_R \quad (7)$$

求解故障距离, 有

$$d = \frac{KU_S - KU_R - KZ_{abc}I_R}{KZ_{abc}I_S - KZ_{abc}I_R} \quad (8)$$

故障距离是实数, 式(8)改写为

$$d = \operatorname{Re} \left(\frac{KU_S - KU_R - KZ_{abc}I_R}{KZ_{abc}I_S - KZ_{abc}I_R} \right) \quad (9)$$

得到以正序分量为参数的测距表达式为

$$d = \operatorname{Re} \left(\frac{KU_S^1 - KU_R^1 - KZ_{abc}^1 I_R^1}{KZ_{abc}^1 I_S^1 - KZ_{abc}^1 I_R^1} \right) \quad (10)$$

根据本文提出的故障录波系统形成的双端测距方法, 能够有效利用两端量测信息量, 实现故障录波信息的高效利用。

4 应用分析

以某变电站10 kV配电线路出线进行研究, 根据变电站内故障录波装置对出线回路的量测数据进行分析论证。两端的电压和电流波形如图9、图10所示。

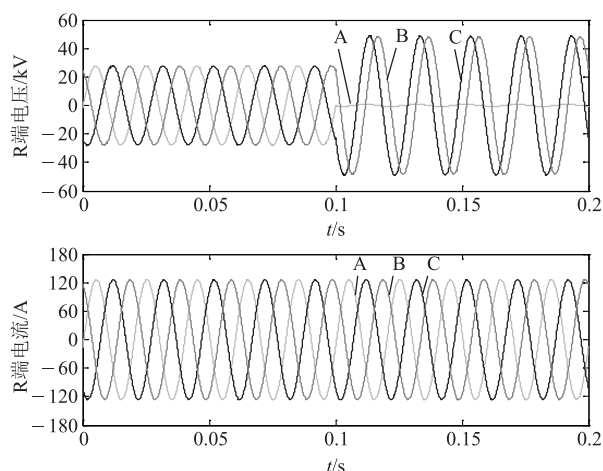


图9 R端相量曲线

Fig. 9 R-end phasor curve

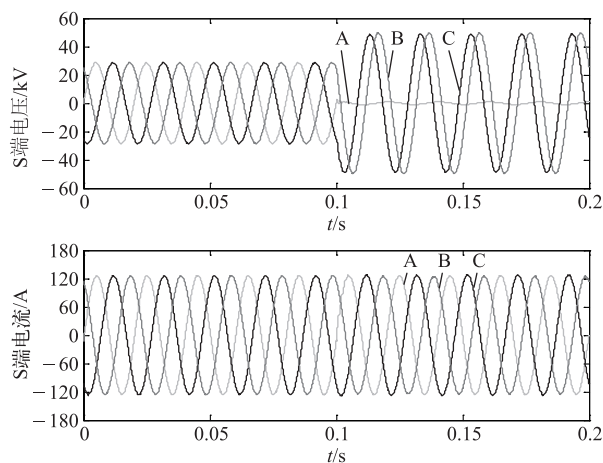


图10 S端相量曲线

Fig. 10 S-end phasor curve

根据两端量测得到电压、电流的正序相量, 其中S端的正序电压、正序电流相量为 $U_S^1 = 20.347 \angle -0.0148 \text{ kV}$, $I_S^1 = 89.234 \angle -3.6236 \text{ A}$, R端电压、电流正序相量为: $U_R^1 = 19.486 \angle -2.8317 \text{ kV}$, $I_R^1 = 89.785 \angle -6.9246 \text{ A}$ 。

考虑单相接地故障, 即 $k_a=1$ 、 $k_b=k_c=0$ 。利用式(10)可得故障距离为0.4974(pu), 即故障的估算距离为14.9214 km。

结合实际案例, 在14.1986 km处出现故障, 得到实际值与计算值之间的相对误差为0.4015%。可以看出, 本文的方法具有较高的准确度。

本文提出的基于变电站故障录波的双端测

距方法，能够有效利用物联网监测系统背景下的故障录波分析模块，提升对变电站内部故障信息的收集和处理能力，将双端测距方法应用到故障检测中，形成定位准确度较高、计算较简洁的方法，具有一定的应用推广价值。

5 结束语

本文提出了基于物联网监测系统的变电站故障录波特征分析系统，结合故障录波分析原理建立了双端测距模型。利用实际工程案例，对提出的双端测距方法进行论证，说明了提出模型的有效性和适用性。

参考文献

- [1] 但路浩，廖晓春，刘斌. 基于故障录波主站的实时在线保护评价方法[J]. 电子技术与软件工程，2018(23): 204-205.
- [2] 郑发林，蒙亮，巫聪云，等. 基于故障录波数据

的变电站中压系统故障特征分析[J]. 电工技术，2015(10): 77-79.

- [3] 全杰雄，温才权，黄永丰，等. 基于故障录波的直流系统瞬时接地监测系统研究[J]. 电子设计工程，2022，30(17): 100-103，108.
- [4] 赖天德，王世祥. 基于电气相连状态的一、二次系统故障自动区分方法研究[J]. 电工技术，2021(19): 106-108.
- [5] 金明亮，李会新，谢俊，等. 基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径策略[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(4): 176-181.

作者简介

沈秀兵（1978—），男，工程师，主要研究方向：电力系统继电保护。

（收稿日期：2023-01-12）