

配电线路故障定位装置关键技术的研究

首先介绍了配电线路故障定位装置的应用现状,分析了定位装置实际使用中存在的问题;接着阐述了基于零序电流合成的接地故障判断优化方法,并对三相同步关键技术进行了可行性认证,研究结果表明该方法对接地故障判定准确率有大幅提升;针对于低负荷取电无法满足装置正常工作的问题,详细论证了提高取电效率和降低平均功耗相结合的能量管理策略,装置可以适应较大范围线路负荷下的供电能力;最后针对于电力监控系统安全防护的要求,提出了基于国密算法的数据安全加密方法,设计了安全加密业务流程和安全防护机制。通过对定位装置关键技术的研究,提升了装置的性能,更能满足实际应用需求。

何松生 王于波 庞振江 丰廷政/北京智芯微电子科技有限公司(北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心)

0 引言

在配电网系统中,线路分支多、运行情况复杂,发生短路、接地故障时,故障区段(位置)难以确定,给检修工作带来不小的困难,尤其是偏远地区,查找起来更是费时费力^[1]。智能型故障指示器在普通型就地显示的基础上,增加了数据远传功能。当线路发生故障时,装置可以及时确定故障区段、发出故障报警指示并上报主站,大大缩短了故障区段查找时间,为快速排除故障、恢复正常供电,提供了有力保障^[2-3]。目前市场上产品种类繁多,但良莠不齐,实际使用存在故障误报漏报、取电难及安全性差等问题。本文针对配电线路故障定位装置存在的问题,给出详细的解决方案。

1 配电线路故障定位装置简介

1.1 应用场景

配电线路故障定位装置(以下简

称定位装置)由采集单元、汇集单元和主站组成。采集单元负责线路电流的采集、短路故障的判定以及接地故障特征数据的采集;汇集单元负责把采集单元采集信息汇总传输给主站;主站进行数据分析和故障定位,并将故障信息及时下发。其应用场景如图1所示。

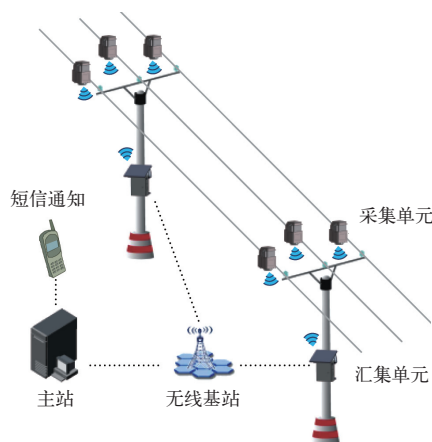


图1 配电线路故障定位装置应用场景

1.2 系统功能

当线路发生故障时,定位装置可以自动定位故障区间,将故障信息及时下发,帮助维修人员迅速赶赴现场,排除故障,实现配电线路故障定位的“遥信”功能;当线路正常运行时,定位装置对线路电流、相电场及温度进行实时在线监测及故障预警,提前发现并解除故障隐患,实现配电线路故障定位的“遥测”功能。

2 定位装置当前存在的问题

2.1 接地故障判断准确率低

目前定位装置接地故障判断主要有无源方式和有源方式。无源方式的代表



何松生/高级工程师

关键词/Keywords

故障定位·
配电线路·
接地故障·
零序电流·
感应取电·

为首半波法和谐波法。首半波法原理基于接地故障发生在电压峰值这一假设，不能反映相电压较低时的接地故障；相对于基波信号，电网谐波信号要小很多，谐波法测量误差也非常高。有源方式通过增加信号源来放大接地的暂态过程信号，对于金属接地永久性接地故障的判断准确率有所提高，但对其他类型接地故障的判断作用并不大，同时有源方式带来停电施工、消弧安全和工程费用等问题。由于目前接地故障判断方法的局限性，故障定位存在很多误报、漏报情况，有的厂家故障判断准确率甚至低于50%，给运行维护带来了很大困扰，也降低了系统的工作效率，接地故障判断准确率亟待提高^[4-5]。

2.2 取电功率无法维持全功能工作要求

采集单元安装在架空线路上，通过太阳能或TA磁感应取电，同时配置超级电容和锂电池作为后备电源。由于太阳能取电受天气影响较大，TA磁感应取电方式更加可靠^[6]。目前传统厂家磁感应取电效率不高，厂家通常标称当线路负荷达到15 A开始取电，达到30 A可以满足全功能工作要求。但在10 kV配电线路末梢或夜晚时段，线路负荷较小，经常低至15 A以下，取电效率低导致电池使用频繁，严重降低了装置的使用寿命^[7]。提高TA磁感应取电效率和降低设备的平均功耗对装置性能的提升意义重大。

2.3 数据传输的安全性无法保证

根据国家发展和改革委员会发布的《电力监控系统安全防护规定》（2014年第14号令）要求：生产控制大区的业务系统在与其终端的纵向联接中使用无线通信网、电力企业其他数据网（非电力调度数据网）或者外部公用数据网的虚拟专用网络方式（VPN）等进行通信的，应当设立安全接入区。本系统远程信道租用运营商公网GPRS，网络安全性差，需要加密传输；本地信道采用的微功率无线通信方式，存在被侦听、欺骗攻击等安全隐患，也有必要对其通信数据进行加密传输。目前配电自动化和用电信息采集系统已实现数据安全加密传输，但隶属于生产控制大区

的配电线路故障定位系统，很少有厂家实现数据安全加密传输，实现通信系统的数据安全加密不容忽视。

3 定位装置关键技术的研究

3.1 基于零序电流合成的接地故障判定方法研究

相对于架空型，采用零序电流分析判断接地故障的电缆型故障定位装置故障定位准确率要高出很多。由于10 kV架空线路三相分开走线，架空型故障定位装置不能直接检测到零序电流^[8]，零序电流分析法无法直接采用，但可以参考配电自动化馈线终端FTU的零序电流合成法。与馈线终端FTU采用有线传输不同，架空线路在线监测系统中汇集单元和采集单元通过微功率无线方式通信，网络延时和时钟同步准确度性能较低，高准确度三相时钟同步要求对零序电流合成带来了挑战。为此，定位装置增加故障录波功能并通过对故障录波数据同步来合成零序电流，作为接地故障的判据。

下面以具体例子阐述接地故障的判定原理，若采集单元A发现接地异常，触发接地故障判定流程，由汇集单元收集故障、录波数据等信息，并完成接地故障的判定。详细流程如图2所示。

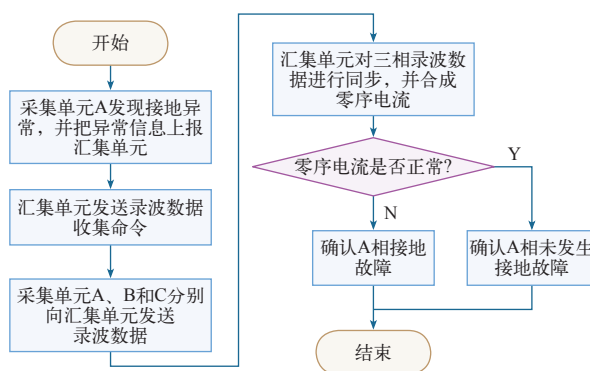


图2 基于零序电流合成法的接地故障判定流程

零序电流合成法大大提高了接地故障判定的准确率，实际测试准确率在90%以上，很好地解决了接地故障定位准确率低的难题。

3.2 高效率、低功耗能量管理策略的研究

3.2.1 采集单元能量管理方案

采集单元电源管理系统如图3所示，主要包括TA取电模块、电源控制模块和储能模块三个部分。TA取电互感器从线路直接感应得到一定大小的交变电压，再通过相应的整流电路和电源变换电路对其进行处理，最后输出稳定的直流电压供给负载使用。储能模块采用锂电池和超级电容，当线路负荷较大时，TA输出功率较高，用超级电容作为能量缓冲元件，避免能量过剩导致装置发热过度；当线路负荷较小，TA输出功率不足，电源控制模块进行主备电源切换，由可储能的超级电容供电，辅以锂电池补充。电源控制模块还设计了泄能电路，在TA输出功率较高而且超级电容能量储满情况下，通过元件发热对多余能量进行释放，避免损坏设备。

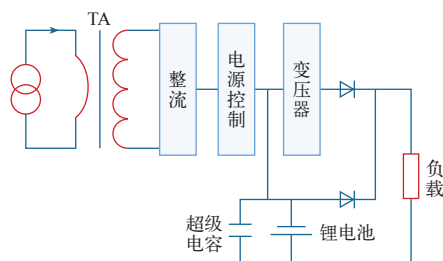


图3 采集单元电源管理系统

3.2.2 高效率的TA取电互感器

电流互感器取电线圈的负载等效模型如图4所示，取电效率最大输出功率

$$P_{\max} = 3.14f\mu SI_1^2/l$$

式中， f 为电源频率； μ 为磁心的磁导率； S 为取电线圈磁心截面积； I_1 为一次电流； l 为取电线圈磁路长度^[9]。

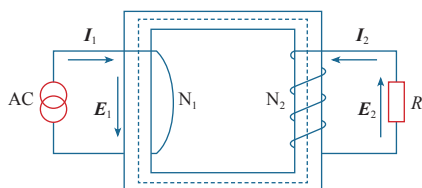


图4 取电线圈负载等效模型

定位装置互感器外形尺寸、重量有严格要求，使得磁心截面积、磁路长度有一定限制，而电源频率也是固定不变的；在此情况下，要提高装置在小电流下的供电能力，提高磁心磁导率是唯一有效的方法。但当线路负荷增加到一定大小以后，磁心将进入饱和状态，其磁通基本不会再有变化，这有利于在大电流下抑制电流互感器的功率输出。但此后若线路负荷继续增加，则磁心将进入到深度饱和的状态，持续发热，对整个电源的工作稳定性带来影响。因此又要使磁心在较小电流工作时远离深度饱和区，这就要求磁心材料具备较高的饱和磁感应强度^[10]。

传统导磁材料硅钢片具有较高的饱和磁感应强度，但初始磁导率较低（ $\times 10^3$ ），取电效率不高。相对于硅钢片，坡莫合金材料的初始磁导率提高了40倍以上（ $5 \sim 8 \times 10^4$ ），磁性能稳定，抗腐蚀性好，但坡莫合金饱和磁感强度不够高，价格昂贵，加工和热处理工艺复杂。现代纳米晶磁材料也具有非常高的初始磁导率（ $4 \sim 8 \times 10^4$ ），饱和磁感应强度介于硅钢片和坡莫合金之间；同时，纳米晶磁材料加工工艺简单，价格低廉，并具有更好的耐蚀性和磁稳定性。因此，确定使用纳米晶作为互感器材料。

硬件设计中，互感器磁心采用纳米晶材料，取电线圈磁力线长度40 cm，磁心截面积 1 cm^2 。当一次线路负荷达到5 A时，测得最大取电输出功率约40 mW，可以满足采集单元全功能工作的电源要求。

3.2.3 灵活的休眠唤醒机制

为了解决线路负荷较小情况下装置电池消耗过快问题，采用基于休眠唤醒机制的低功耗设计方法。装置的工作模式可分为非低功耗模式和低功耗模式，当线路负荷高于5 A时，采用非低功耗模式，TA取电功率可以满足全功能工作电源要求，支持高速采样、实时通信以及故障录波等高级应用；当线路负荷低于5 A时，采用低功耗模式，降低设备的平均功耗。装置电源消耗主要集中在数据采样和数据传输部分，在没有检测到

故障的时间段，采用休眠模式，降低数据采样频率，降低通信模块传输频率，以达到低功耗模式下降低装置平均运行功耗的目的；而在线路发生故障时，可以通过硬件触发唤醒，进入到正常工作状态，在故障数据处理完毕后，又可以自动切换到休眠模式。

(1) 低功耗采样

基于休眠唤醒机制的采样模式如图5所示。在小负荷电流状态，当线路没有故障发生时，采用休眠采样模式（1个周波3~5个采样点），通过定时唤醒在“采样-休眠-采样”状态下循环，此状态下采样平均功耗可以降低到20 μA 。当线路发生故障时，通过硬件唤醒，迅速进入高速采样模式（1个周波64个采样点），相对于休眠模式，此状态下采样功耗增长了10倍，但由于故障发生的时段占比非常小，实际运行中，平均功耗增长并不多。

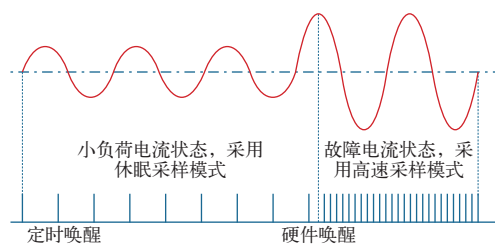


图5 基于休眠唤醒机制的采样模式

(2) 低功耗通信

基于休眠唤醒机制的通信模式如图6所示。在小负荷电流状态，当线路没有故障发生时，采用低功耗通信模式，通过定时唤醒在“接收-休眠-接收”状态下循环，接收时功耗达到10 mA，休眠时功耗5 μA ，此模式下通信模块平均功耗可以降低到10 μA 。当需要发送数据时，发送端持续发送唤醒帧（短报文），得到接收端接收状态

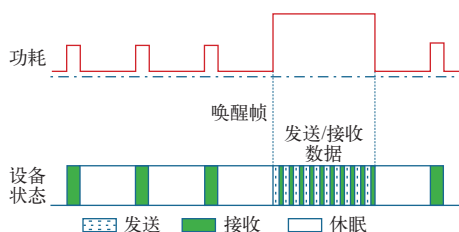


图6 基于休眠唤醒机制的通信模式

（需等待）的确认后，开始发送/接收数据，完成数据交互，发送/接收数据时最大功耗达到20 mA，采集单元一般每15 min向汇集单元发送一次数据，每次持续时间约100~200 ms，通信模块总体平均功耗不超过15 μA 。

3.3 基于国密算法数据安全策略的研究

3.3.1 安全加密的实现方式

采集单元和汇集单元内置ESAM数据安全芯片，实现了数据加/解密、双向身份认证等功能。主站侧增加密钥管理系统和加/解密机，密钥管理系统负责对外提供密钥管理服务和Web服务，与密码机共同完成密钥全生命周期的管理，负责整个安全体系密钥的生成、传递、备份、应用和销毁等全生命周期的管理与维护；加/解密机实现了数据加/解密，负责产生和存储密钥索引和密钥数据，配合密钥管理服务器完成密钥全生命周期的管理。数据安全加密业务流程（以上行业业务为例）如图7所示。

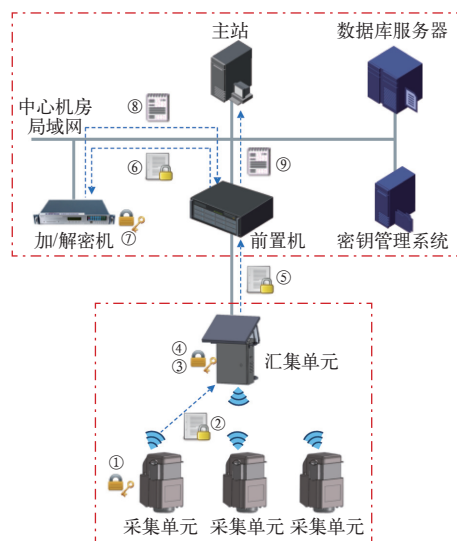


图7 数据安全加密业务流程

- ①—采集单元发送上行业务请求并加密 ②—采集单元发送密文数据
- ③—汇集单元进行解密 ④—汇集单元对数据重新加密
- ⑤—汇集单元发送密文数据 ⑥—前置机提取业务数据，发起解密请求
- ⑦—加/解密机进行解密 ⑧—加/解密机返回明文数据
- ⑨—前置机发送明文数据至主站

3.3.2 加密算法的选择

本项目使用的是国家密码管理局指定的商用

密码算法，其中，对称算法为SM1算法，非对称算法为SM2算法，数据压缩算法为SM3算法。SM1算法因其加密速度快的特点，主要用于数据的加解密；SM2算法主要用于数据的签名和鉴签，实现双向认证和会话密钥协商；SM3算法主要用于数据签名过程中的摘要计算。

3.3.3 安全防护机制

主站系统和定位装置数据安全防护方式中,采用双向认证、数据加密和数据完整性保护。

1) 双向认证。主站和定位装置在进行数据的交互之前,主站和定位装置首先验证对方身份的合法性,该过程通过签名验证和私有密钥验证来保证。双方认证通过,才进行下一步的数据交互。

2) 数据加密。对于敏感性数据, 通过对称密钥加密, 确保数据的保密性。为了防止密钥过度使用带来的安全风险, 采用密钥协商机制, 实现“一次一密”, 确保密钥的安全性。

3) 数据完整性保证。对于关键数据,为了防止在传输过程中被篡改或破坏的数据被采纳,影响数据的真实性,需要加强数据的完整性保护,在传输数据后附加基于对称密钥的消息认证码MAC。

4 结束语

本文通过分析配电线路故障定位装置使用中存在的问题,提出了相应的解决方法,并对关键技术作了可行性分析。相对于传统智能型故障指示器,本项目的研究成果主要体现在以下几个方面:①大幅提高了接地故障判定准确率,现场试验表明,接地故障判定准确率在90%以上;②供电效果优化明显,当线路负荷低至5 A时,装置的取电功率可达到40 mW,可以满足全功能工作的电源需求;③低功耗模式降低了装置平均功耗,休眠状态下平均功耗低至20~30 μ W,延长了装置的使用寿命;④基于国密算法的数据安全加密方

式, 实现了从采集单元、汇集单元到主站的“端到端”数据安全加密。

参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 436—2010 配电线路故障指示器技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 郭谋发. 配电网自动化技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 陈煦斌, 秦立军. 配网故障指示器最优配置研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (3) : 100-104.
- [4] 胡日亮, 刘访, 甘向锋, 等. 新型配电网数字故障指示器及定位系统 [J]. 电力与能源, 2014, 35 (3) : 345-348.
- [5] 张杰, 毕贵红, 陈仕龙, 等. 基于压缩感知理论的小电流接地故障选线法 [J]. 中国电力, 2013, 46 (12) : 6-11.
- [6] 郭昊坤, 吴军基. 一种新型的可充电式高压感应取电装置 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (3) : 86-90.
- [7] 冯小明, 吴国平, 周献飞, 等. 基于非接触式电流互感器取电的故障指示器设计 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (12) : 98-102.
- [8] 薛永端, 吴敏, 王俊江, 等. 一种电压型配电网单相接地故障处理方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (12) : 1-4.
- [9] 刘亚东, 盛戈皞, 王又佳, 等. 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (3) : 70-74.
- [10] 王玉峰, 赵敏, 罗沛文. 一种高压线非接触式自取电电源的设计 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42 (6) : 178-180.

(收稿日期: 2016-06-30) **EA**



欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告