

基于云计算的配电线路小电流接地故障监测方法研究及应用

华光辉¹, 栗峰¹, 张祥文¹, 许晓慧¹, 方明²

(1. 中国电力科学研究院有限公司新能源与储能运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 210003;

2. 苏州银蕨电力科技有限公司, 江苏 苏州 215028)

摘要: 针对现有配电自动化系统中利用馈线终端设备和故障指示器等配电终端实现线路运行工况远程监测和故障定位所表现出的不足, 提出了一套新型配电线路监测方法, 并基于云计算技术开发了配电线路小电流接地故障监测系统。该监测系统集智能电网传感器、无线通信和云计算技术应用平台于一体, 使得配供电系统透明可见, 可提高配电网运行的经济性和可靠性。

关键词: 配电网; 小电流接地; 故障监测; 云计算; 无线通信

Research and application of monitoring method of small current grounding fault in distribution line based on cloud computing

HUA Guanghui¹, LI Feng¹, ZHANG Xiangwen¹, XU Xiaohui¹, Fang Ming²

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Suzhou Silver fern Power Technologies Co., Ltd., Suzhou 215028, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings in the existing distribution automation systems, such as the use of feeder terminal devices and fault indicators, and other distribution terminals to achieve remote monitoring and fault location of line operation conditions, a new type of distribution line monitoring method is proposed. And based on the cloud, computing technology, a small current ground fault monitoring system for distribution lines is developed. The monitoring system integrates smart grid sensor, wireless communication and cloud computing technology application platform, making the distribution system transparent and visible, improving the economic and reliability of distribution network operation.

Key words: distribution network; small current grounding; fault monitoring; cloud computing; wireless communication

0 引言

我国大多数配电网均采用中性点非直接接地系统, 即小电流接地系统, 当小电流接地系

统发生单相接地故障时, 由于单相接地不形成短路回路, 故障线路流过的故障电流为所有非故障线路对地电容电流之和, 故障电流远小于负荷电流^[1]。另外, 随着我国新能源发电的快速发展, 很多以分布式发电的形式接入配电网,

国家电网公司科技项目 (NY71-18-070)

使配电网潮流变化更为复杂。因此,相对于短路故障,小电流接地故障更难进行快速、准确的故障定位,这也是长期困扰电力系统的一大难题。传统故障定位办法是利用变电所馈线终端设备发出的接地信号进行拉闸(路)选线,选出接地线路,然后对接地线路进行人工巡查,找到接地故障点。这种方法需要大量倒闸操作,故障定位时间长,人力资源投入大,而且没有发生接地的线路也需要短时间停电,这对供电要求高的企业会造成影响,需要建设或改造配电(馈线)自动化系统,提高故障定位自动化水平^[2-3]。

我国已建成的配电自动化系统中,通常采用小电流接地故障选线装置和故障指示器进行故障选线和故障定位。小电流接地故障选线装置通常安装在变电站或配电所,实时监测出线线路电压和电流等信息,实现发生小电流接地故障时选择故障线路的功能。故障指示器是一种安装在架空线或电缆、开关柜、环网柜和分支箱上的一种故障电流监测装置,通过大量故障指示器的广泛布置,实现配电线路的故障定位功能。传统故障指示器通过监测本地过电流来判断故障是否发生,过电流原理仅适用于能够产生大电流的恶性相间短路故障,但根据统计,在小电流接地方式的配电网中,80%以上的故障是会产生大电流的单相接地短路,此时传统的故障指示器的故障指示准确性会大幅度降低,容易造成漏判或误判^[4-6]。

云计算是基于互联网相关服务的增加、使用和交付模式,通常涉及通过互联网来提供动态易扩展且经常是虚拟化的资源,它作为一种新型的信息与计算(Information and Communication Technology, ICT)资源提供模式,在技术上可根据系统需求弹性提供ICT资源,在经济性上可降低系统使用ICT资源的成本。所以将云计算技术引入电力系统,运用于ICT资源需求较高的配电网自动化中,无论从技术还是经济上都具有广阔的前景。

结合现代传感和通信技术的最新发展,本文提出一套基于云计算平台的配电网线路监测方法,并进行智能监测装置的研发,从而准确而快速地监测和定位配电网线路和设备的故障情况,提高配电网供电可靠性,减少停电时间和损失,有效缩短维护时间,减少故障巡线人员的工作量,提高工作效率,提升电网的经济运行能力,同时减少电力用户因配电网线路或设备故障而停电所造成的经济损失^[7-9]。

1 小电流接地故障分析

1.1 稳态分析

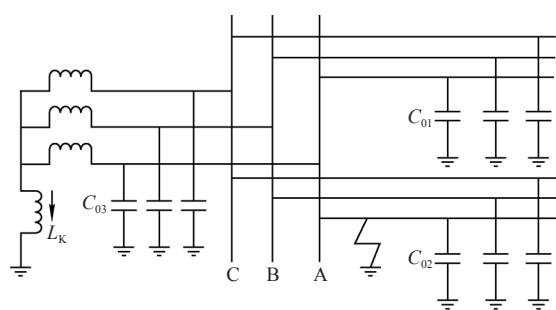
(1) 中性点不接地电网单相接地故障稳态特征

小电流接地电网发生单相接地故障后,假设故障电阻为零,则故障相电压为零,非故障电压升高。小电流接地电网单相接地故障示意图及其稳态零序等效网络如图1所示。其中,线路零序电容等于线路对地电容;虚拟电源电压等于故障点零序电压,与故障前故障电压幅值相等、方向相反。小电流接地故障的稳态电气量还具有以下特征:①流过故障点电流值是正常运行状态下电网三相对地电容电流的算术和;②母线处非故障线路零序电流为线路本身的对地电容电流,其方向由母线流向线路;③母线处故障线路零序电流为电网所有非故障单元对地电容电流的总和,幅值一般远大于非故障线路,其方向由线路流向母线,与非故障线路相反^[10]。

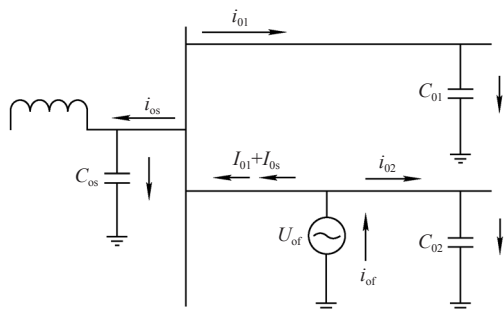
可见,故障线路零序电流特征与非故障线路有明显的区别,据此可选择故障线路。

(2) 谐振接地电网单相接地故障稳态特征

谐振接地电网发生单相接地故障时,消弧线圈的电感电流经接地点沿故障相返回,接地点的电流增加一个电感分量的电流,电感电流与电容电流相位相反,使流过接地点的总电流接近为0,从而使接地电弧自动熄灭的可能性大为增加。谐振接地电网单相接地故障及其稳态零序等效网络如图2所示。



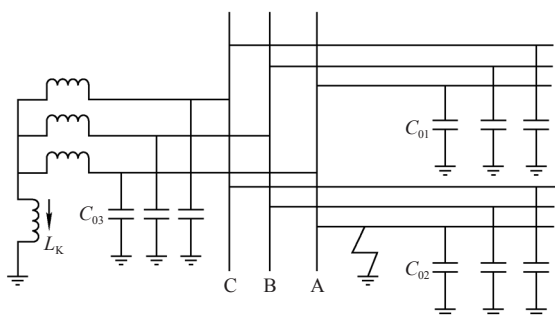
(a) 单相接地故障示意图



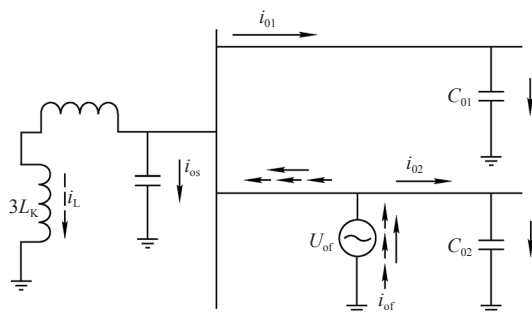
(b) 稳态零序等效网络

图1 小电流接地电网单相接地故障示意图及其稳态零序等效网络

Fig.1 Schematic diagram of single-phase grounding fault of small-current grounded power grid and its steady-state zero-sequence equivalent network



(a) 单相接地故障示意图



(b) 稳态零序等效网络

图2 谐振接地电网单相接地故障示意图及其稳态零序等效网络

Fig. 2 Schematic diagram of single-phase grounding fault of resonant grounding grid and its steady-state zero-sequence equivalent network

根据对电容电流补偿程度的不同,谐振接地分为全补偿、欠补偿及过补偿三种运行方式。为了防止线路发生串联谐振,一般采用过补偿方式。

当采用过补偿方式时,流过故障点的电流呈感性。这时,母线处故障线路的零序电流是本身对地电容电流与接地点残余电流之和,其方向是由母线流向线路,与非故障线路零序电流的方向一致,因此难以根据电流方向来判断故障线路。由于过电流补偿度不大,残余电流比较小,故障线路零序电流的幅值较中性点不接地情况大为减少,甚至会小于非故障线路的零序电流,所以也很难根据零序电流幅值来判断故障线路。

1.2 暂态分析

要严格地计算出小电流接地故障暂态信号的变化会很复杂,而使用简化的等效电路进行分析,得出一些初步的结论,可以较好地把握暂态信号基本特征。

在分析暂态过程中,用于工频稳态分析的对称分量(正序、负序和零序)法不再有效,需要使用变换矩阵是实数的模变换法。模量1、2分别为在两相导体(A相与B相、B相与C相)之间流动的线模分量,参数值与对称分量法中正序网络一致(忽略正序与负序电源参数之间的差别);模量0为在三相导体与大地之间流动的零模分量参数值与零序网络一致。基于卡伦包尔变换,得出在发生小电流接地故障后(如A相接地)计算其暂态分量的等效模量网络如图3所示。

其中, $e(t)$ 为计算故障分量的虚拟电压源,与故障前故障点电压大小相等,极性相反。由于电源阻抗远小于分布电容阻抗,在模量1、2回路中忽略了分布电容,只考虑串联电感的影响。在零模网络中,电源回路串联了消弧线圈的电感,而对于中性点不接地系统来说,零模网络的电源端是开路的。由于电源端开路或者是串联了数值很大的电感和电阻,故只考虑分

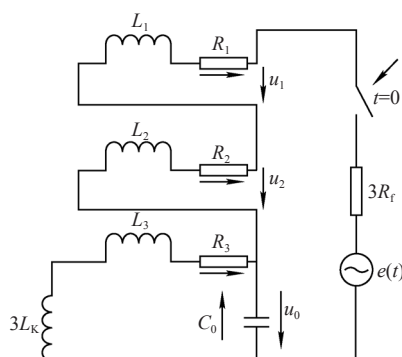


图3 小电流接地故障等效模量网络

Fig. 3 Equivalent modulus network of small current grounding Fault

布电容的影响。

在接地电阻较小时，零模电容充电速度比较快，可以忽略消弧线圈的影响，得到近似暂态过程计算等效电路如图4所示。

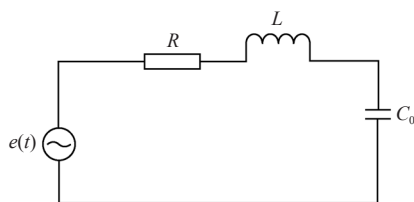


图4 接地电阻较小时暂态过程计算等效电路

Fig. 4 Transient process calculation equivalent circuit when the grounding resistance is small

图4中， C_0 为零序电容； L 为两个线模回路电感之和（近似等于2倍的正序电感值）； R 等于两个线模回路电阻与3倍的接地电阻值之和。

假设故障发生在电压出现峰值时，令 $e(t) = U_m \cos \omega t$ ，得到暂态零模电流为

$$i_0(t) = U_m \omega C_0 (\omega_0 / \omega e^{-\delta t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t - \sin \omega t) \quad (1)$$

式中， $\delta = R / 2L$ 为自由分量的衰减系数； $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC_0}$ 为回路的共振频率。由于 $\delta \ll \omega_0$ ，可近似认为 $\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \approx \omega_0$ 。

由于 $U_m \omega C_0$ 是稳态情况下的电容电流 I_c ，因此，暂态电流表达式可近似写为

$$i_0(t) = I_c (\omega_0 / \omega e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - \sin \omega t) \quad (2)$$

据此可得出小电流接地故障暂态零模电压与零模电流曲线如图5所示。在时间是共振周期

的 $1/4$ 时， $\sin \omega_0 t = 1$ ，自由分量数值最大，求出暂态最大电流值为

$$i_{\max} = I_c (\omega_0 / \omega e^{-\delta t} - \sin \omega t) \quad (3)$$

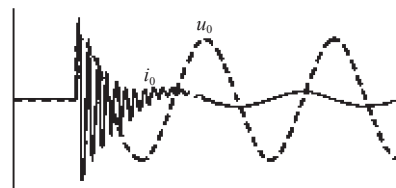


图5 小电流接地故障暂态零模电压与电流曲线

Fig. 5 Small current ground fault transient zero-mode voltage and zero-mode current curve

可见，暂态电流的最大值与稳态电流之比近似等于共振频率之比，可能较稳态值大几倍到十几倍。

在接地电阻较大时，可以忽略图3等效电路中线路回路串联参数的影响。但由于零模电容充电速度比较慢，对谐振接地系统来说，则需要考虑消弧线圈的影响，此时得到暂态过程计算等效网络如图6所示。

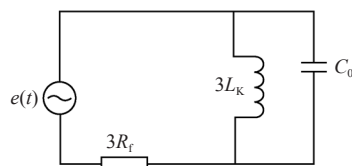


图6 接地电阻较大时暂态过程计算等效网络

Fig. 6 Transient process calculation equivalent network when the grounding resistance is large

可以证明，在接地电阻达到一定数值（数百欧姆）时，图6电路中的暂态自由分量将出现振荡衰减现象。极端情况下，自由分量衰减时间常数达数十毫秒，振荡周期接近工频值，这时，自由分量与稳态零序电压相抵消，使得系统零模电压幅值缓慢上升，持续时间达数十个周波。大电阻接地时零模电压变化曲线如图7所示。

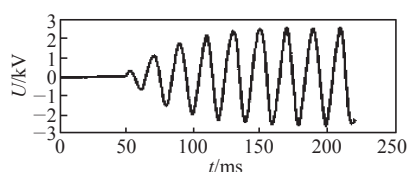


图7 大电阻接地时零模电压变化曲线

Fig. 7 Zero-mode voltage variation curve when large resistance is grounded

2 基于云计算的配电线路故障监测系统开发

2.1 体系架构

云计算是一种基于网络的计算方式，它的共享软件及硬件资源按照需求提供给其他计算机和设备。

基于云计算的配电线路小电流接地故障监测系统，由前端的智能电网传感器和后端云计算平台组成。智能电网传感器可等电位安装在配电网的架空线、电缆转架空线、变电站（所）出线 and 环网柜出线等位置。传感器完成安装位置线路电流、温度等数据的采集。云计算平台负责接收存储来自各节点传感器的海量数据，同时进行大数据分析以实现线路实时监测和故障快速定位。智能电网传感器采用成熟的4G技术和互联网（internet）通信实现与云计算平台之间高速可靠的数据传输。

云平台可以使用专有云或私有云，为保证系统信息安全，云平台与互联网之间以及云平台与配电网自动化系统之间要设置信息安全隔离区。整个系统结构如图8所示。

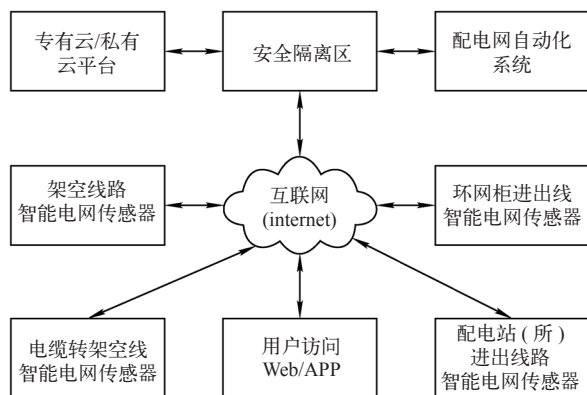


图8 配电线路监测系统结构

Fig. 8 Distribution line monitoring system structure

2.2 智能传感器开发

智能电网传感器采用感应自取电，以32位低功耗数字信号处理器为中央处理器，外围集成了全球定位系统（GPS）接收器、4G通信模块、高精度模数转换器（ADC）、温度传感器和大容量数据存储器等。智能电网传感器的

基本结构如图9所示。

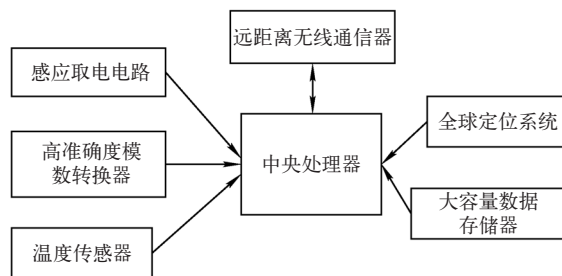


图9 智能电网传感器结构

Fig. 9 Smart grid sensor structure

智能电网传感器可安装在任意位置测量配电网的实时数据，使得电网完全透明可见，其具有以下特点。

（1）自供电免维护

智能电网传感器本身无须外接电源，通过自身的电流互感器感应取电，电路从电力线中获取电能，同时通过对传感器内部各硬件模块的分时通断控制实现超低功耗设计。免去传统电力测量设备耗电大、需要采用TV取电供电或外接蓄电池等独立供电电源的要求，省去了建设电源系统的投资、施工和维护等需求。

（2）采样数据精确同步

智能电网传感器基于GPS授时实现高速采样数据的精确同步，所有数据都会被打上同步时间标签。后台可根据统一的时间标签调取同一时刻各个传感器中的采样数据，从而实现全网采样数据的精确同步。

（3）分布式录波

大容量数据存储可支持长达数小时的连续采样数据存储。当任一传感器监测到突变电流扰动时，自动将扰动时刻前后数十个周波的采样数据存入非易失存储器，并上报扰动时刻至后台，后台根据需要从相关的传感器调取这一时刻的录波数据，实现了分布式录波的功能。

（4）空中接口软件升级

与智能手机一样，智能电网传感器可通过空中接口对其进行软件升级（OTA）。OTA功能为传感器的软件版本升级、订正缺陷及增

加新功能提供了便捷的途径,大大降低了维护成本。

(5) 非侵入式安装无破坏性

智能电网传感器具有微型化、重量轻和体积小特点,采用卡扣式安装方式。可带电安装于线路任何地点,不需要改接电力线等,没有任何破坏性。单个传感器平均数分钟内即可安装完成。

2.3 云计算平台开发

云计算平台是一个功能强大的云计算网络,其中包括大量并发的网络计算和服务,并通过虚拟化技术扩展每一台服务器的计算能力,将各自的计算资源通过云计算平台整合起来,提供超级计算和存储能力。云计算体系结构如图10所示^[11]。

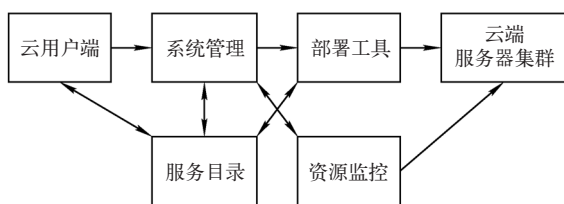


图10 云技术体系架构

Fig. 10 Cloud technology architecture

(1) 云用户端

为使用云计算平台的用户提供请求服务的交互界面,同时也是用户使用云服务的统一入口。云用户端采用B/S结构,用户可以通过Web浏览访问、注册、登录及定制所需服务、配置与管理。

(2) 服务目录

云用户在取得相应的权限后,可以选择已有的服务列表或定制专属的服务列表,也可以对已有服务进行退订,云用户端会以画面展示相应的服务。

(3) 管理系统与部署工具

提供管理与服务的工具。具有管理云用户,对用户授权、认证和登录权限进行管理的能力,并且可以管理可用的计算资源与服务,接收云用户发送的各类请求,根据用户请求调研相应的程序,调度计算与存储资源,智能部

署资源与应用,动态地配置和回收资源。

(4) 监控系统

监控与计量云系统资源的使用情况,通过监控资源迅速作出反应,完成节点同步配置、负载均衡设备配置和资源监控,确保资源能顺利分配给有需求的用户。

(5) 服务器集群

虚拟的或物理的服务器,由管理系统负责高并发量的用户请求处理、大运算量计算处理、用户Web应用服务和数据传送与存储等。

云计算平台使用JAVA语言开发,采用MySQL数据库整合了百度地图。平台采用浏览器/服务器架构,通过Web访问使用个人计算机、手机或平板电脑都可以进行登录操作。

平台接收存储来自各节点传感器的海量数据,同时集成了必要的工具软件和各种模块化应用软件。工具软件用于配置部署传感器组网,通过逻辑分组可实现数千个传感器的组网管理及单个传感器的参数配置和管理。平台上的应用分析软件用于挖掘分析处理这些全域原始数据,通过去粗取精、去伪存真,提取关键特征信息并以图形界面的方式报告显示。据此,运行维护人员可深入掌握了解配电网运行工况,作出及时和准确的决策,从而保证配电网的安全可靠高效经济运行。该平台既可独立运行,也可与已有的配电自动化系统或SCADA系统集成一体。

2.3.1 传感器配置管理

云计算平台可通过工具软件对各传感器进行远程配置管理和维护,实现传感器的逻辑分组、状态监测、参数配置和软件升级,保证传感器的可靠运行。

1) 逻辑分组。通过对传感器按照其所属变电站名称和线路名称进行逻辑分组,方便传感器的检索。

2) 状态监测。动态跟踪监测每个传感器的运行状态,确保传感器工作正常。

3) 参数配置。根据传感器安装的具体位置

和系统运行方式，远程设置传感器的门限值定值等。

4) 软件升级。当需要对传感器进行缺陷订正、功能升级时，通过空中接口完成软件版本上传更新。

2.3.2 位置导航

每个智能电网传感器投入运行后，可获取自身的GPS定位信息并上报至后台，传感器安装地点的实际地理位置可自动在地图中以光标形式显示。当系统监测到配电线路发生异常或者故障时，异常或者故障区段两端的传感器会以红色图标进行报警提示，通过地图中的导航功能，引导检修人员快速到达故障位置，以缩短线路检修和停运时间。

2.3.3 数据分析

该系统既支持配电线路正常运行工况的远程监测，同时又可以进行故障判别和定位。可对配电线路的以下信息进行监测和统计：每相线路的最高、最低温度及其出现时间，平均温度，温度越限时长，最大、最小电流及其出现时间，平均电流，电流越限时长，总谐波失真（THD）最大值、最小值及其出现时间，平均谐波THD，各次谐波分量平均值等。

3 监测系统在实际工程中的应用

3.1 设备安装线路选择与施工

2017年初，宁夏某供电公司安装四套智能电网传感装置，开元变电站宏图二回线主干线和南分支线各两套，智能电网传感器与云平台共同组成基于云计算的配电线路小电流接地故障监测系统。设备安装过程如图11所示。



图11 设备安装过程
Fig. 11 Device installation process

3.2 各项功能调试

3.2.1 地理信息

可以在电站地图上直接显示设备安装位置，如图12所示。

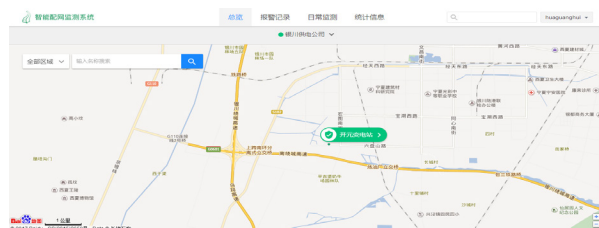


图12 地理信息图片

Fig. 12 Geographic information picture

3.2.2 日常监测

监测点三相电流有效值24 h记录，如图13所示。



图13 日常监测图片

Fig. 13 Daily monitoring picture

3.2.3 瞬时波形

监测点三相电流瞬时值200 ms记录，如图14所示。

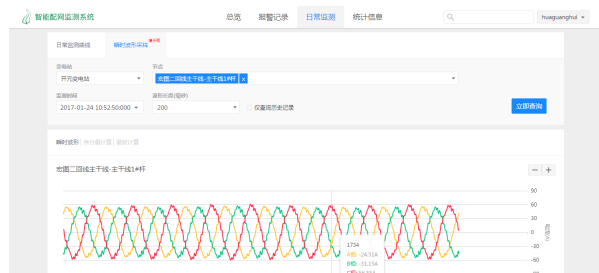


图14 电流瞬时波形图片

Fig. 14 Current waveforms

3.2.4 序量分析

监测点三相电流序量值200 ms记录，如图15所示。

3.2.5 谐波计算

监测点三相电流谐波值200 ms记录，如图

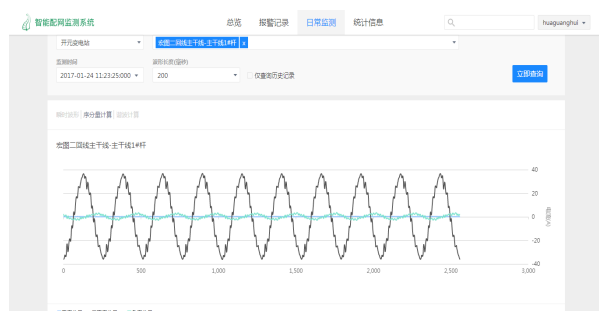


图15 序量分析图片

Fig. 15 Sequential analysis picture

16所示。

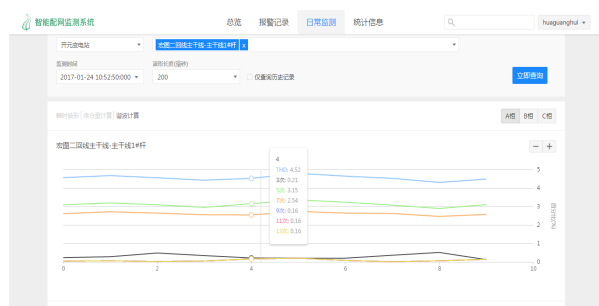


图16 电流谐波分析图片

Fig. 16 Current harmonic analysis picture

3.2.6 统计分析

监测点三相电流当日负荷曲线记录，如图17所示。

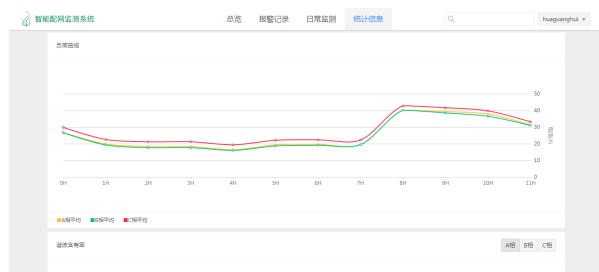


图17 当日负荷曲线统计

Fig. 17 Statistics of the daily load curve

3.2.7 故障告警

监测点24 h内故障告警信息查询，如图18所示。

4 结束语

研发了一套基于云计算技术的配电线路小电流接地故障监测系统，系统由智能电网传感器、无线通信和云计算平台三部分构成。



图18 近24 h故障告警信息

Fig. 18 Fault alarm information within 24 hours

该系统用户可以对配电线路瞬时电流、电流量、电流谐波和负荷情况进行监测、分析和统计，并能够给出故障告警信息。配电网中大量部署智能电网传感器，可实现小电流接地故障的快速定位。

通过对监测数据的进一步挖掘，还可实现多种应用，如故障定位和隔离恢复、谐波污染的监测与补偿、对三相负载不平衡的监测和调整以及事件录波等，有助于提升配电网的可视化水平和可靠性水平。

参考文献

- [1] 徐丙垠, 薛永瑞, 李天友, 等. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备, 2005, 6(4): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongrui, LI Tianyou, et al. Review of fault line selection technology for low current grounding[J]. Electric Power Equipment, 2005, 6(4): 1-7.
- [2] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Overview of fault location technology for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [3] 苏展立. 10 kV配网线路常见故障分析与防范措施[J]. 科技与创新, 2015(23): 158-159.
SU Zhanli. Analysis of common failures of 10 kV distribution lines and precautionary measures[J]. Science, Technology and Innovation, 2015(23): 158-159.
- [4] 刘健, 赵树仁, 张小庆, 等. 配电网故障处理关键技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24):

- 88-93.
- LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technology of fault handling in distribution network[J]. Power System Automation, 2010, 34(24): 88-93.
- [5] 龙维民. 基于故障指示器的配电网故障自动定位系统[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 65-69.
- LONG Weimin. Fault indicator based automatic fault location system for distribution networks[J]. Electric Power Equipment, 2006, 7(11): 65-69.
- [6] 梁丰. 10 kV配电网常见故障原因分析及对策[J]. 电力通讯, 2014(18): 133-134.
- LIANG Feng. Analysis and countermeasures of common faults in 10 kV distribution network[J]. Electric Power Communication, 2014(18): 133-134.
- [7] 孟祥萍, 周来, 王晖, 等. 云计算技术在未来智能电网信息处理平台中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(10): 3508-3511.
- MENG Xiangping, ZHOU Lai, WANG Hui, et al. Application of cloud computing technology in future smart grid information processing platform[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(10): 3508-3511.
- [8] 范寅秋, 弭娟. 云计算技术在智能配电自动化中的应用研究[J]. 电能知识与技术, 2011, 7(25): 6168-6170.
- FAN Yinqiu, MI Juan. Application of cloud computing technology in intelligent distribution automation[J]. Electric Power Knowledge and Technology, 2011, 7(25): 6168-6170.
- [9] 王宾, 孙华东, 张道农. 配电网信息共享与同步向量测量应用技术评述[J]. 中国电机工程学报, 2015(35): 1-7.
- WANG Bin, SUN Huadong, ZHANG Daonong. Review of application technologies for information sharing and synchronous vector measurement in distribution networks[J]. Proceeding of the CSEE, 2015(35): 1-7.
- [10] 高洪梅, 胡希同. 含分布式电源配电网电流差动保护数据同步采样新方法[J]. 山东理工大学学报, 2012, 26(3): 93-95.
- GAO Hongmei, HU Xitong. A new method for synchronous sampling of current differential protection data of distribution network with distributed power supply[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2012, 26(3): 93-95.
- [11] 高涛. 基于云计算的配电网自动化系统设计[J]. 电气技术, 2014(7): 103-105.
- GAO Tao. Design of distribution network automation system based on cloud computing[J]. Electric Engineering, 2014(7): 103-105.

作者简介



华光辉

华光辉(1983—),男,硕士,研究方向为新能源发电并网运行控制、分布式发电与主动配电网、电动汽车有序充电、区域综合能源协调控制技术。

(收稿日期: 2018-02-01) **EA**