

# 变电站PTN线远程在线监测装置与系统集成关键技术研究应用

王志华,王建勇,郭明叙,龙永平,张志林,林冠新  
(广东电网有限责任公司 珠海供电局,广东 珠海 519000)

## Research and Application of Key Technology of Remote On-Line Monitoring Device and System Integration for PTN Line in Substations

WANG Zhihua, WANG Jianyong, GUO Mingxu, LONG Yongping, ZHANG Zhilin, LIN Guanxin  
(Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, Guangdong, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problems of the PTN line maintenance and the weakness of the on-line monitoring system existing currently, a new System of Integrated PTN Line Monitoring Device and System Integration is developed according to the anti-accident measures of relay protection in China Southern Power Grid. The system has gone through the field test and dynamic monitoring data analysis with all the functions have been tested and put into trial operation in two 110 kV substations in our company with stable and satisfactory result up to today. The system is the first one to realize the effective on-line monitoring and data monitoring management on the PTL 600 line in China, and it is also able to perform the real-time monitoring of the working state of the normal operation of the PT (the imbalance states of the neutral point in the secondary circuit), and to feed back the operation information to the operation staff in a timely manner to ensure the stability and safety of the complex relay protection and automatic devices of the large power grid. The developed system helps to realize the local collection of the PTN line operation data and to provide the physical basis for PTN line monitoring device and realize the remote management of the data from the PTN and management of large data of the PT neutral line. The system integrates data collection, remote transmission analysis & management, and fault warning functions and is able to form the job forms of the PT neutral point monitoring as specified by China Southern Power Grid Corporation. The system integration

can replace the manual inspection and realize the automatic alarm, and through the system data analysis, it can provide the basis for the substation PT equipment maintenance, optimization management, and identification and judgment of soundness of the PT equipment.

**KEY WORDS:** substation PTN600 monitoring technology; monitoring device; remote key parameter management; early warning system

**摘要:** 中国南方电网有限责任公司继电保护反事故措施汇编要点中明确规定对PT二次回路一点接地电流进行定期的检测,针对当前变电站PT一点接地线维护工作中所存在的问题,反映出在线监测系统的不足,为此研制出了新型的“变电站PTN线远程在线监测装置与系统集成”。通过现场试验和动态数据监测分析,已经完成装置全部功能的测试。目前在珠海供电局两个110 kV站投入试运行,装置运行稳定。在我国电力系统PTN600线上实现了有效在线监视和数据监测管理,对PT二次回路一点接地的不平衡状态的动态数据进行实时滚动循环监测,及时给工作人员反馈运行信息,有效保证了大电网复杂继电保护以及自动装置的运行稳定安全。该系统的研发,实现了PTN线运行数据就近采集,为PTN线在线监测装置提供物理基础;实现PTN线上电流数据进行远程技术管理,可通过珠海供电局4 G专线或GPRS精确远传到继电保护办公室的计算机办公平台,提供可靠的PTN线大数据运行分析管理,形成采集、远程传输、分析管理、故障预警系统集成,最终形成南方电网所要求的PT中性点监测的作业表单。该系统集成代替人工巡视,自动预警,可通过系统数据分析,为变电站PT设备的维护、优化管理、识别判断PT设备健康运行提供依据。**关键词:** 变电站PTN600监测技术;监测装置;远程关键参数管理;预警系统

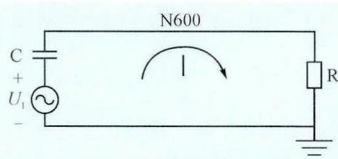
基金项目:广东电网公司职工创新基金(GDZC-03042015005)。

Project Supported by Staff Innovation Fund of Guangdong Power Grid(GDZC-03042015005).

# 1 PTN一点接地和两点接地的工程分析及必要性

## 1.1 工程分析

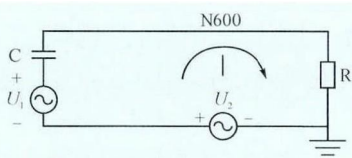
变电站运行中的PT设备是电力系统重要的传感设备,在主电网系统中有着极其广泛的应用。目前我国电力系统PTN线运行数据的在线管理监测几乎是个盲点,由于PT运行中所出现的问题给继电保护正确动作评价以及电网的安全运行带来极其严重的威胁,所以引起了上级专业主管部门的重视。PT二次N600回路接地问题的工程等值理论计算如下,如图1、图2所示。



PT一点接地等值原理示意图

图1 PT一点接地等值原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PT



PT两点接地等值原理接线图

图2 PT两点接地等值原理接线图

Fig. 2 PT two-point grounding diagram

1) 依据等值电路原理分析,对图1所形成的回路方程式为:

站内PT二次回路一点接地为正常时,PTN600线回路一点接地回路方程计算如图1所示,形成回路方程(1)

$$I_{a2} = \frac{U_1}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{U_1}{X_c + R} = \frac{\Delta U_1}{\Sigma R} \quad (1)$$

式中: $U_1$ 为N600线对地电压,正常时很小,近似于零; $I_{a2}$ 为N600线回路中电流,正常运行时,除去PT运行的不平衡因素外几乎也是零; $\Sigma R$ 为N600线回路导线电阻以及接触电阻的总和。

2) 依据等值电路原理分析,对图2所形成的回路方程式为:

站内PT二次回路两点接地时,PTN600线回路接地回路方程计算如图2所示,形成回路方程(1) PTN600线回路两点接地的计算如图4所示,其计算

公式为:

$$I_{a2} = \frac{U_1 - U_2}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{U_1 - U_2}{X_c + R} = \frac{\Delta U_1}{\Sigma R}$$

$$U_2 = I_{a2} \Sigma R = I_{a2} \Sigma \left( \frac{1}{j\omega C} + R \right) =$$

$$I_{a2} \Sigma \left( \frac{1}{j\omega C} + R \right) = I_{a2} \Sigma \left( \frac{Rj\omega C + 1}{j\omega C} \right) \geq 0 \quad (2)$$

$$I_{a2} = \frac{\Delta U_1}{\Sigma R} \geq 0 \quad (3)$$

式中: $\Delta U$ 为N600回路两点接地间上产生的电压差; $I_{a2}$ 为流经N600线回路的两点接地短路电流; $\Sigma R$ 为N600线回路连接的回路线电阻和接触电阻; $j\omega C$ 为N600导线的对地电容所形成的容抗。

综上计算比较,PTN600除在继电保护室一点接地外,若在其他回路有接地点,其两点接地在变电站地网上存在一定的电势差即等值原理图2中的 $U_2$ ,由于电势差 $U_2$ 的存在,使得继电保护室的永久接地点与另一接地点间出现环流。通过以上的理论计算分析和比较,该电流将永远大于式(1)的电流值。式(3)电流值目前规定不允许大于50 MA,如果大于50 MA就证明回路PT二次回路存在两点接地且相当严重。若该值接近经验值,就必须引起重视,必须继续严格盘查回路接地情况。由于两点接地的存在,产生中性点电压偏移,从而使得继电保护装置所测量到的电压发生相位和相对幅值的变化,也就是说给每相电压附加了一个随机的、不确定的变量电压。计算式(4)所示。

$$\Delta U = I_{a2} \Sigma R = I_{a2} \Sigma \left( \frac{1}{j\omega C} + R \right) \quad (4)$$

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_a + \Delta U \quad (5)$$

$$\dot{U}_{b1} = \dot{U}_b + \Delta U \quad (6)$$

$$\dot{U}_{c1} = \dot{U}_c + \Delta U \quad (7)$$

由此可以看出,两点接地的存在,产生中性点电压位移,导致N600线回路电阻和接触电阻分配比例的不确定性,从而导致继电保护装置的测量电压的不确定性,最终导致主电网复杂保护测量的不正确性,其结果将导致保护误判,保护误动或者拒动,直接危及大电网安全运行稳定。

## 1.2 必要性

依上述基本工程分析和长期的现场运行维护测试积累和事故缺陷处理情况,根据网省继电保护反事故措施要点有关通知精神,对变电站运行的PT

一点接地进行常态化的巡视监测。对此,我们的研发了一种小电流高灵敏度的PT一点接地动态监测装置,并在PT一点接地处加装一个高精度且强干扰的交流霍尔传感器,将其回路的不平衡电流通过通信网络,每天24 h在线监测,在线监测判断识别,滚动循环显示其PT一点接地电流的动态情况,并将其远传至继电保护人员办公室电脑平台。对其运行数据状态进行系统分析,形成南方电网所要求的作业表单。我们经过长时间的现场探索和研究,证明这个办法可行,其主要技术优点在于以下几点:

1) 继电保护人员用人工周期性地在各变电站PT切换屏中性点用高精度钳形电流表测试记录的方式,来识别判断PTN二次回路一点接地点动态电流的大小和变化趋势,这种定时巡视方式,无法解决无人值守变电所要求的自动在线监测的问题。

2) 由于目前系统的发展以及区域负荷的不断增长,用电需求剧增,因此运行的变电站以及在建设中的变电站颇多,检修任务繁重,继电保护人员数量

有限,这样给定期去现场测试带了困难,所以PTN自动在线监测装置与系统集成,给继保人员带来了系统性技术管理希望。

3) 装置自动检测,自动判断识别,自动故障预警,自动形成报告。“变电站PTN线远程在线监测装置与系统关键技术的研究与应用”对于PT二次回路多点接地及时发现和迅速处理赢得时间,保证继电保护正确动作,稳定电网安全运行具有重要的意义。

本文介绍了由广东电网有限责任公司珠海供电局实施的“变电站PTN线远程在线监测装置与系统集成”研究包括PTN线运行关键参数采集和试验、装置样机的研制、装置监测预警系统研发等。详细介绍了500 kV站,220 kV装置样机设计、工厂测试和变电站现场测试。PTN线监测预警系统研发实现了PTN线运行状态预警系统的系统功能规范化、终端功能集成化,通信规约统一化和应用支撑平台一体化。图3为该PTN工程的系统网络图。

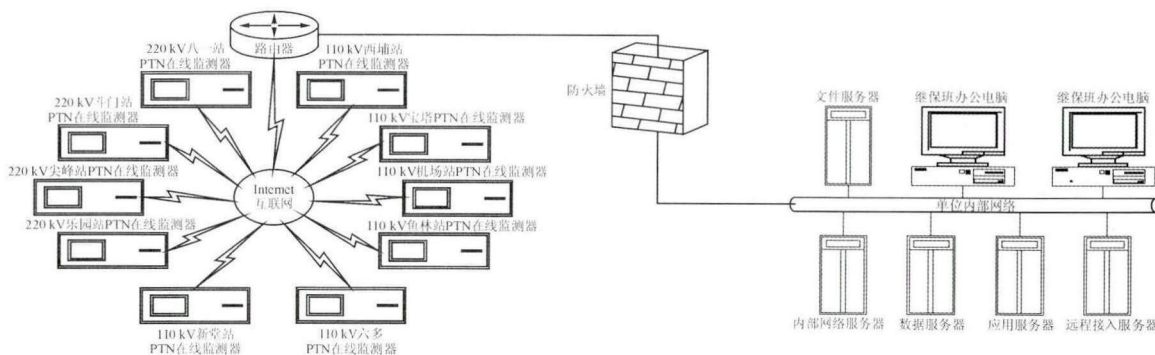


图3 PTN600测控装置与系统集成网络图

Fig. 3 Diagram of PTN600 measurement and control device and system integrated network

## 2 装置与系统技术方案研究

PTN线参数监测装置与其他在线检测装置完全不同,要在运行且平衡度较高的PTN线回路监测出不平衡毫安级电流比较困难。中性线上肯定存在不平衡电流,若采用普通的小型电流互感器将会使电流互感器的测量误差而造成的测量精度很高,这给技术方案的研究试验带来许多不利因素。我们采用精度高、不易受电磁场干扰的交流霍尔互感器进行数据采集。经现场试验,符合装置检测需要。本次装置采集与预警的基本原理判据为:

$$\begin{cases} \Delta U \geq 0 \\ I_{a2} = \frac{\Delta U}{\Sigma R} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

每组PT电压互感器出现不平衡运行、中性点N线存有不平衡电流毫安级、只要符合式(8),电流大于给定值时就会立即动作并预警,同时就会瞬时在继保人员的计算机平台上反映出来,通知及时处理。

### 2.1 回路组成

传感器模块、采集比较模块、CPU识别判断模块、显示模块、GPRS模块、通信管理模块和电源模块共计7大模块构成。各模块通过测试和计算机办公平台相连接,形成新的技术管理模式下的变电站PTN600

线远程在线监测管理装置与系统集成,对变电站所有PTN线在运行模式下进行不间断的循环监测并预警,达到对其检测管理一体化目的。方框图如图4所示,更能清晰地表明其这个系统的工作过程。

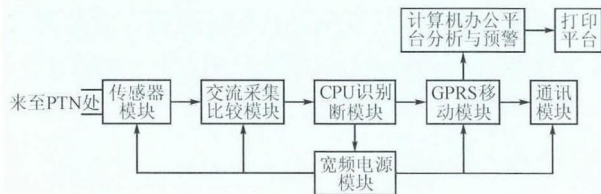


图4 PTN线远程在线监测装置与系统集成原理方框图

Fig. 4 Principle block diagram of PTN line remote on-line monitoring device and system integration

## 2.2 回路接线

变电站各个PTN回路集结控制室PT切换屏的接线情况,实际包含了该站的各层次电压等级的PTN回路,同时也包含了线路PTN的回路。从图3中可以看出,每个支路都安装一个测量精度很高、量程一定、数据反映准确且有一定耐压水平的交流霍尔互感器,本次设计共16路(包含总支路),其中支路PTN 15路,总PTN 1路。如图5所示,通过其向PTN监测装置输送不平衡电流,达到常态情况下的循环监测,并且反映PT运行常态的监测。



图5 各路PT中性点N线回路接线图

Fig. 5 N line wiring diagram of PT neutral points

目前变电站中PT设备二次N线依据最新设计原则,都将所有PT二次的N线引至控制室的电压切换屏端子排上,再根据各PTN分级(电压等级)排列原则和标注识别安装其交流霍尔互感器,逐一确认各支路PTN线间隔名称,实现PTN监测装置的现场采集。当某一支路PT二次回路不正常时或回路有一点接地时,在其接地点的支路和总的PTN回路都出现越限的电流值,此时远程预警,同时在办公室的计算机平台上观察到该站PTN的实时运行参数值以及

预警值,还可以打印该站的实时运行作业表单,提供给运行人员以及继电保护人员进行分析处理,实现远程实时监测技术管理,提供系统分析依据。

这种方式在变电站PT切换屏处安装极为方便快捷,采用精准度较高、抗干扰能力较强的小型互感器,用双绞线传输电流信号,因此在现场安装过程中,引线须使用双绞线,主要是因为传输的信号较弱,易受外界干扰,所以需将双绞线两侧屏蔽接地。

基于以上思路,珠海供电局变电管理所研究中心对国内PT二次监测技术进行收集、归纳和比较,对珠海电网系统变电站PTN运行参数及故障类型进行分析和计算,提出了适用于珠海电网系统的PTN远程监测技术方案、检测装置的基本功能和关键技术参数,并利用仿真技术进行分析,根据这些研究确立了珠海供电局变电站PTN线远程在线监测装置样机研发的基本技术条件和功能范围,提出了按照变电站的电压等级逐级由小到大顺序排列,对应所监测的PTN线装置,对于500 kV站应采用独立的检测装置并要求其装置容量更高。对接入的PTN远程监测装置的基本要求如下:

1) 为满足PTN监测装置在变电站PT切换屏中的长期运行,保证其在线监测的参数需要,要求其稳定性好,不应产生谐波和噪声等对系统的影响。

2) PTN检测装置在控制室PT切换屏中占用空间小,安装简单,操作简便,维护工作量小,机箱防静电效应合格,故现场采用的是3U机箱结构。

3) PTN线远程在线监测装置功能进行了研究,开发了远程在线监测与系统,并利用实时在线数字仿真系统(RTDS)进行了完整的测试。

4) PTN线远程在线监测装置预留有RS-485通讯口以及GPRS通讯口,提高该设备的利用率,增强对变电站实时在线动态监测的技术支撑能力。

## 3 PTN线远程在线监测装置样机的研制

### 3.1 PTN600监测装置样机

PTN600监测装置样机模拟原理见图6,该样机采用宽频电源80~260 V工作电源,样机测定额定最大输入电流150 mA,额定输入电压100 V,最大额定功率100 W,额定频率50 Hz,装置绝缘耐压2 000 V,

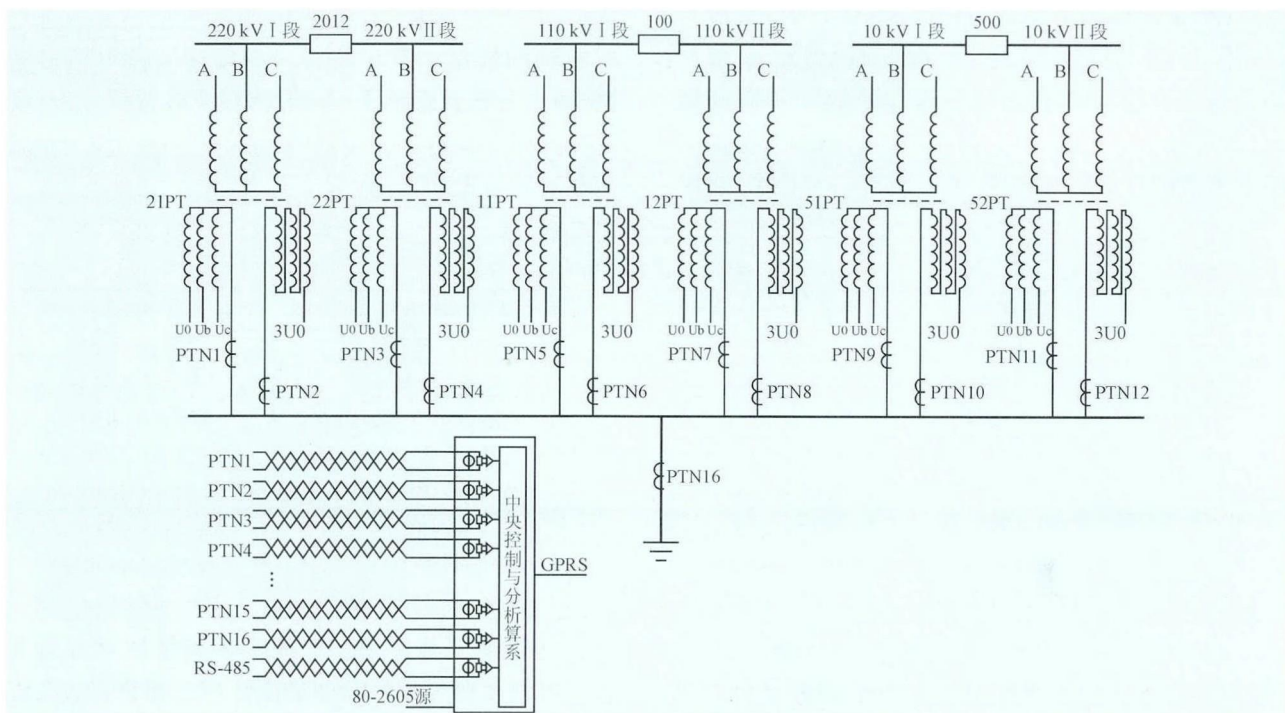


图6 变电站样机模拟原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the prototype of the substation

采用特制的高精度交流霍尔传感器,其测定的电流调节范围0~150 ma,测定的精度误差0.02%,具有1.5倍的过载能力,其内部的小型互感器特定制作,并进行了一定的特殊置换后供CPU计算分析。装置具有谐波分析与实际PT接地识别功能,预警功能完善。在变电站控制室PT切换屏采用集中式安装。装置预留具有交流量的扩展接口和RS-485通信口,通过本单位4 G专线或GPRS移动通信传输技术数据,现场安装十分便捷。

通过上述模拟系统完整接线方式,对接入PTN600线系统的影响分析和现场测试数据能够为PTN监测装置提供PT运行的不平衡数据,为运行和维护有价值的参考。

### 3.2 PTN远程在线监测装置试验应用

2015年10月我们研制技术人员分别选定一个220 kV凤凰站和110 kV新涌站。该两个站一个PT运行负荷重PTN线多,另一个110 kV站仅有10 kV两段母线PT,PT相对来说二次负担小,装置具备监测技术应用条件,因此现场按照要求分别将监测装置样机接入PTN系统运行。由于采用了合理的设计原则,有效利用了控制室PT切换屏的场地条件,不影响变电站PT二次设备系统的整体运行和检修,现场安装工作量少,调试现场安装便利,节省安装投资,为

PTN线远程监测装置在已运行的变电站试验应用到示范作用。

根据国内电网系统PT运行情况,分析,在PTN600线一点接地处远程在线监测动态不平衡电流,可以赢得及时处理时间,为继电保护的正确动作起到了关键作用。我们根据现场运行条件,研究和确定了PTN检测装置系统调试监测和试验项目,并完成了装置样机谐波的计算和实测数据的对比分析。图7为装置样机窗口显示实时数据图表。

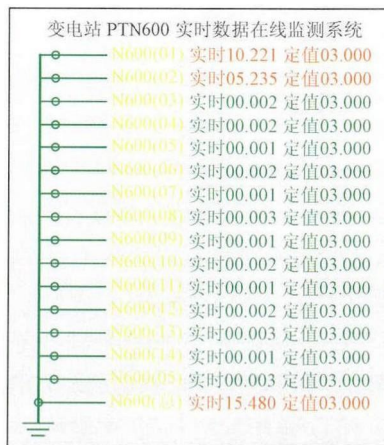


图7 装置样机接入PTN系统运行实时试验数据图表

Fig. 7 Test data chart of the real-time operation of the prototype Device integrated with PTN system

图7是现场通过实际模拟试验51PT两点接地所显示的画面。现场又模拟了52PT的B相接地,装置自动显示红色部分都超过了预设值数,所以预报警,并将数据通过GPRS点对点的传输到继电保护实验室预设的计算机平台中,通过程序打开GPRS数据

软件包,作业表单上所反映的预警数据与实际现场所看到的数据一致无差异。现场还测试了谐波数据,通过分析该数据无碍于PTN检测装置的运行,同时更无碍于机电保护装置的运行和影响。现场试验实测对调数据如表1所示。

表1 现场试验实测对调数据

Tab. 1 Measured data of the field test

序号	昂立继保测试仪	A-300 多功能伏安相位表	变电站PTN线远程在线监测装置	办公室继保平台显示
	东堡站/新涌站	东堡站/新涌站	东堡站/新涌站	东堡站/新涌站
01	10 mA /10 mA	9.93 mA /9.94 mA	9.93 mA /9.95 mA	9.93 mA /9.95 mA
02	20 mA /20 mA	19.94 mA /19.96 mA	19.95 mA /19.96 mA	19.95 mA /19.96 mA
03	30 mA /30 mA	30.03 mA /30.05 mA	30.03 mA /30.05 mA	30.03 mA /30.05 mA
04	50 mA /50 mA	50.02 mA /50.05 mA	50.02 mA /50.05 mA	50.02 mA /50.05 mA
05	80 mA /80 mA	80.12 mA /80.05 mA	80.13 mA /80.05 mA	80.13 mA /80.05 mA
06	90 mA /90 mA	90.05 mA/90.10 mA	90.05 mA/90.10 mA	90.05 mA/90.10 mA
07	100 mA /100 mA	101.03 mA /101.15 mA	101.05 mA /101.17 mA	101.05 mA /101.17 mA

通过本次装置样机的现场测试和对4G通道两侧的对调调试,PTN600线远程在线监测装置与系统的研制应用试验成功表明:

1) 通过现场对PTN监测装置样机的试验,用其技术手段进行远程技术管理PT一点接地动态数据的变化情况,是一场技术管理的创新,为实现把现有变电站的PT一点接地全面集约化管理、提升站内设备上等级、复杂继电保护的安全稳定运行、及时处理分析设备缺陷奠定了良好基础。

2) PTN监测装置样机现场安装,并对电网运行的PTN600一点接的交流霍尔互感器进行合理接入,现场准确模拟了PT两点接地,该装置与系统能满足考核其功能和动态性能的要求,装置接入对原有PT二次一点接地不受任何影响,反而增强了PT中性点的可见性与可靠度。

3) 装置样机试运行后,装置与系统运行稳定,可在详细测试PTN线策略基础上进一步满足对PTN系统整体动态性能测试,大大减轻了继电保护及运行维护人员的工作量,降低了维护成本,显影了投资少、见效快、安装便捷、使电网的社会安全效益增强。

4) 装置样机每天24 h不间断循环显示监测数据和预警处理,并实时传输数据,便于继电保护人员在办公室进行统计分析和打印,随时掌握各变电站PT运行的健康情况,为本单位上级设备管理部门和领导进行技术决策提供可靠的信息依据。

5) PTN600检测与系统的研制与应用试验测

试,通过全面验证动态性能是否满足技术规范要求,可以及时发现运行中的电压互感器即PTN系统运行缺陷,通过及时反映PT中性点参数变化状态并加以分析,可及时采取措施消除设备运行隐患,为电网主设备PT二次系统长期安全稳定运行提供技术支持和保障。

6) PTN监测装置样机在珠海电网系统的试运行,是珠海供电局技术人员立足岗位,坚持勇于创新的结果,标志着珠海供电局在PT二次回路一点接地远程在线监测装置的关键技术、系统的设计以及研制、现场对应通道的调试、运行和应用等方面取得了成功。

## 4 结语

通过广东电网有限责任公司珠海供电局PTN远程在线监测技术的研究与应用,将功能完整、实用性强、安全价值高、运行效果显著、成本低廉、投资少的PTN监测远程在线监测技术与装置集成应用于珠海电网系统,为变电站设备提供了升级管理的一种有效的技术手段。该装置的安全性高、保护完备、机箱设计合理、铝合金结构、防静电效应,因而其可靠性较高。PTN监测装置的接入设计是利用现有的现场条件,简便易行。通过PTN远程在线监测装置与系统的试验与测试,其试验调试数据更加印证了该装置技术的可行性、解决方案的完整性、技术策划的正确性,使得科研成果得到了转化,开拓了二次

监测技术在珠海电网中在重要的设备二次回路上应用发挥了示范作用。

### 参考文献

- [1] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网公司继电保护反事故措施汇编[G]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2008.
- [2] 广东电网公司. 2007年广东省电力系统继电保护反事故措施要点[Z]. 广州: 广东电网公司, 2007.
- [3] 杨文佳, 张勇. 南方电网自投装置配置与技术功能规范[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2011.
- [4] 贺家礼, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [5] 陈水耀, 刘宏君, 陈川. 智能变电站继电保护在线测试方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2014(9): 58-61.  
CHEN Shuiyao, LIU Hongjun, CHEN Chuan. Research on relay protection online test in smart substations[J]. Power System and Clean Energy, 2014(9): 58-61 (in Chinese).
- [6] 刘柱揆, 许守东, 周鑫, 等. 基于模拟变电站运行状态的全站交流二次回路检验方法[J]. 南方电网技术, 2013(3): 99-103.  
LIU Zhukui, XU Shoudong, ZHOU Xin, et al. Test method of the whole AC secondary circuits in a substation based on its simulated operation states[J]. Southern Power System Technology, 2013(3): 99-103 (in Chinese).
- [7] 梁雨林, 黄霞, 陈长材. 电压互感器二次回路异常的原

因及对策[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 73-74.

LIANG Yulin, HUANG Xia, CHEN Changcai. The cause of TV secondary wire abnormality and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 73-74 (in Chinese).

- [8] 王红斌, 陈扬, 高雅, 等. 基于数据挖掘的预警技术在一体化输电设备监测中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2014(1): 55-58.

WANG Hongbin, CHEN Yang, GAO Ya, et al. Application of early warning technology in power transmission equipment condition monitoring based on data mining [J]. Power System and Clean Energy, 2014(1): 55-58 (in Chinese).

收稿日期: 2015-06-03.

作者简介:

王志华(1959—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事超高压电网继电保护技术研究分析、管理与运行维护工作;

王建勇(1972—), 男, 高级工程师, 从事电网继电保护管理工作;

郭明叙(1980—), 男, 工程硕士, 工程师, 从事电网继电保护管理工作;

龙永平(1975—), 男, 本科, 高级技师, 长期从事电力系统继电保护技术管理和维护工作;

张志林(1986—), 男, 本科, 工程师, 长期从事电力系统继电保护技术管理和维护工作;

林冠新(1976—), 男, 本科, 工程师, 长期从事电力系统继电保护技术管理和维护工作。

(编辑 黄晶)

(上接第62页)

heuristic strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 35-40 (in Chinese).

- [17] 金敏, 鲁华祥. 一种遗传算法与粒子群优化的多子群分层混合算法[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1231-1238.

JIN Min, LU Huaxiang. A multi-subgroup hierarchical hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Control Theory and Applications, 2013, 30(10): 1231-1238 (in Chinese).

- [18] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995(4): 1942-1948.

- [19] CHEN W, ZHANG J, LIN Y, et al. Particle swarm optimization with an aging leader and challengers[J]. IEEE Trans. Evolut. Comput., 2013(17): 241-258.

- [20] RUDRA PRATAP SINGH, MUKHERJEE V, GHOSHAL S P. Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers[J]. Applied Soft Computing, 2015(29): 298-309.

收稿日期: 2016-03-04.

作者简介:

刘通(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事新能源及负荷管理、电网新设备并网管理工作。

(编辑 徐花荣)