

DOI: 10.7667/PSPC201742

## 继电保护在线状态检修的应用和探讨

叶远波<sup>1</sup>, 陈晓东<sup>2</sup>, 项忠华<sup>2</sup>, 叶远玲<sup>2</sup>, 王薇<sup>1</sup>

(1. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230022; 2. 国网宣城供电公司, 安徽 宣城 242000)

**摘要:** 为解决传统继电保护检修模式存在的问题和不足, 开展了继电保护在线状态检修研究工作。首先通过信息系统在线采集保护设备运行状态数据信息, 为继电保护状态评价提供数据支撑。随即建立继电保护设备状态评价和智能决策信息模型, 对影响继电保护功能的关键环节进行在线状态评价。然后根据评价的结果开展设备状态检修工作。最后提出了继电保护运行环境温湿度和光纤回路收发信功率状态在线检测的实现方法和状态评价策略。在省级电网的检修实践证明: 继电保护在线状态检修能够提高继电保护检修的工作效率和继电保护设备的安全运行水平。

**关键词:** 继电保护; 在线状态检修; 状态数据; 状态评价; 智能决策信息模型; 光纤回路

### Application and discussion on online condition-based maintenance of relay protection devices

YE Yuanbo<sup>1</sup>, CHEN Xiaodong<sup>2</sup>, XIANG Zhonghua<sup>2</sup>, YE Yuanling<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China;

2. State Grid Xuancheng Electric Power Company, Xuancheng 242000, China)

**Abstract:** In order to solve the existing problems and shortcomings of the traditional relay protection maintenance mode, the research work of online condition based maintenance of relay protection is carried out. First of all, the online protection equipment working state data is collected through the information system, providing data support for the relay protection status evaluation. Secondly, it establishes the state evaluation and intelligent decision information model of relay protection equipment, and carries on the on-line state evaluation to the key link that affects the relay protection function. Then, equipment condition based maintenance is carried out according to the evaluation results. Finally, the implementation method and state evaluation strategy, such as on-line detection temperature humidity of relay protection operating environment and transceiver power state of optical fiber loop, are also proposed. The maintenance practice in a provincial power grid proves that the on-line condition based maintenance of relay protection can improve the efficiency of relay protection maintenance and the safe operation level of relay protection equipment.

**Key words:** relay protection; online condition based maintenance; state data; state evaluation; intelligent decision information model; optical fiber loop

## 0 引言

随着现代电网规模的发展, 设备数量不断增加, 传统继电保护定期检修模式已不适应电网生产运行需要。而作为电网第一道防线的继电保护设备, 其运维检修质量将直接影响到电网的安全稳定运行, 因此, 开展继电保护检修新模式探索<sup>[1-5]</sup>十分必要。

继电保护设备传统定期检修模式存在着一些弊端: 一是可操作性差, 受制于电网供电可靠性要求和人力资源的现状, 部分运维单位定期检修完成率不足 75%, 造成大量设备检修任务超周期; 二是检修针对性不足, 定期检修要求所有设备到期必检, 导致部分运行状态不佳设备无法得到及时检修, 而运行状态良好的设备却被过度检修; 三是检修策略不科学, 设备检修策略没有针对对象设备的隐患部位重点开展。长期下去, 势必造成电网继电保护设备运水平下降, 对电网安全稳定运行造成威胁。

国内部分区域电网开展了继电保护离线状态检

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(521200160017)“继电保护状态检修智能决策系统研究与应用”

修的探索工作, 研究了设备可靠性, 通过人工采集的数据进行状态检修工作, 并取得了一定的成果<sup>[6-10]</sup>, 但在实施时存在着一系列问题。首先, 增加了现场人员的状态评价的工作量, 加重了人员负担; 其次, 人工采集获得的设备状态量数据偏少, 难以全面评估设备运行状况; 再者, 离线状态检修策略受人为主观因素影响, 科学性和针对性难以得到保证。

目前继电保护装置已经具有强大的自检、测量、故障记录和数据通信等功能, 可以以非侵入式检测方式在线获取装置状态信息<sup>[11-15]</sup>, 为在线判别继电保护装置健康状态和在线确定设备检修策略提供了可能。

本文提出一种新的继电保护在线状态检修的技术。在现有在线采集继电保护装置运行状态信息<sup>[16-21]</sup>的基础上, 设计新型的状态检修体系结构, 收集设备状态数据; 并基于设备失效模型, 识别故障的早期征兆、定位故障部位、判断故障严重程度及发展趋势; 确定电网继电保护设备的最佳维修时机和检修策略, 提高设备检修工作的效率和针对性, 并在安徽电网的运维检修中得到实践应用。

### 1 在线状态检修结构

继电保护在线状态检修过程由状态数据采集、状态评价和检修策略三个部分组成, 整个过程由智能决策系统自动完成。

继电保护在线状态检修系统结构如图1所示。在状态数据采集部分, 系统自动采集继电保护设备的运行状态数据, 并进行数据处理, 以满足在线状态检修的需要; 在状态评价部分, 系统对继电保护

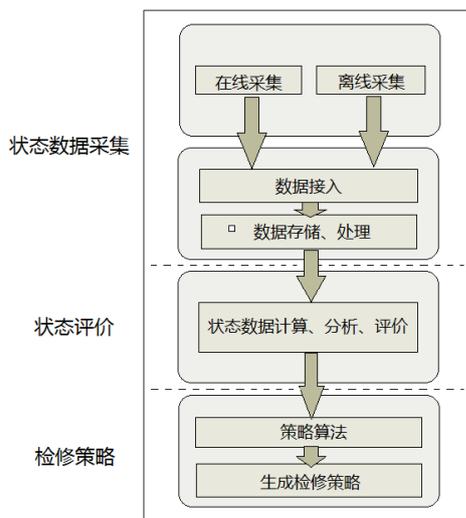


图1 继电保护装置在线状态检修系统框图  
Fig. 1 Block diagram of online condition-based maintenance of protective relays

的设备健康状态进行设备建模, 利用设备在线状态数据对继电保护设备健康状况进行动态评价; 在检修策略部分, 依据状态评价的结果制定设备状态检修策略, 并实现继电保护设备健康状态在线动态预警功能。

## 2 继电保护在线状态检修原理

### 2.1 在线状态数据采集

如图2所示, 部署在系统安全III区的继电保护状态检修智能决策系统, 在线采集继电保护运行状态数据和基础台账数据。

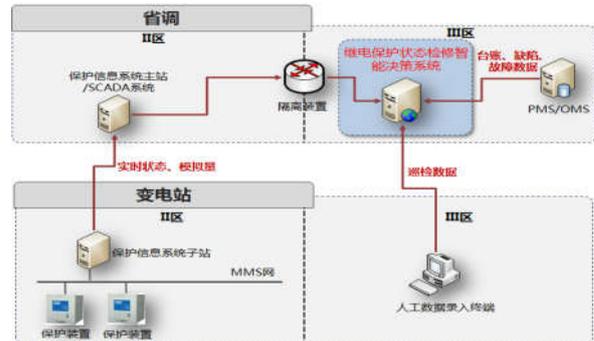


图2 继电保护装置状态数据采集系统框图

Fig. 2 State data acquitting system of protective relays

继电保护运行状态数据部分, 主要是通过部署在安全II区的继电保护信息系统, 在线采集变电站的继电保护设备装置状态数据, 其中包括自检、告警以及二次回路模拟量采样、装置ADC基准电压、装置运行状态信息等重要状态数据。

基础状态数据部分, 主要是通过智能决策系统数据接口和安全III区的PMS/OMS系统以及专业巡检系统互联互通, 实时获取继电保护装置设备台账数据, 其中包括试验校验、异常缺陷、无故障时间、家族性缺陷和正确动作率等基础状态数据。

继电保护状态检修智能决策系统, 通过专用的数据接口, 实现了重要设备状态数据的源端维护和数据共享, 为继电保护在线状态检修提供了坚强的数据支撑。

### 2.2 在线状态评价

#### 2.2.1 状态评价原则

继电保护状态评价是根据设备缺陷与故障的性质和概率统计分析, 对在役继电保护设备的运行性能进行综合评定, 为设备运行、维护和检修提供依据。继电保护在线状态检修评价原则采用“健康因子”和“状态模拟量”相结合的评分机制, 对继电保护间隔开展状态评价。

### 2.2.2 继电保护健康因子状态评价

健康因子是指直接影响继电保护安全运行的重要状态量，其中， $h_{di}$ 、 $h_{ei}$ 分别代表保护装置和二次回路的健康因子，每一种健康因子有“0”和“1”两种状态。

继电保护装置主要健康因子如表1所示，如果有上述异常发生时，则对应的健康因子状态被评价为“0”，对应保护状态评价项的结果为0分；如对应的健康因子状态被评价为“1”时，则进入继电保护状态评价流程。

表 1 继电保护装置主要健康因子列表

健康因子名称	状态检修信息	获取途径
装置软件版本	软件版本是否一致	PMS/OMS
装置定值检查	定值是否一致	PMS/OMS
反措处理情况	反措是否处理	PMS/OMS
绝缘状况	保护装置箱体和各插件的绝缘是否合格	PMS/OMS
	存储器自检是否异常	
装置定值自检	装置定值是否正常	保护信息系统
装置 ADC 状态	ADC 采样值是否超范围或双 ADC 互检是否异常	保护信息系统
	保护装置长期启动	

### 2.2.3 继电保护状态模拟量

状态模拟量是指反映运行中的继电保护装置健康状况的运行状态数据信息，是开展继电保护状态评价的重要参数。继电保护“状态模拟量”如表2所示。

表 2 继电保护装置主要状态模拟量表

状态模拟量名称	状态模拟量信息	获取途径
装置无故障时间	设备预计无故障时间和实际运行无故障时间	PMS/OMS
家族性无故障时间	同型号和同批次装置无故障时间	PMS/OMS
装置正确动作率	同型号和同批次装置的正确动作率	PMS/OMS
装置 ADC 基准电压	ADC 基准电压采样数据	保护信息系统
装置弱电电源	装置弱电电源的电压采样值	保护信息系统
装置内运行环境	装置内温度和湿度数据	保护信息系统
装置交流采样	装置交流电压、电流和差流的采样值	保护信息系统
光纤通道状态	光纤收信光强值和发信激光管工作电流值	保护信息系统

这些状态模拟量采集自运行中的继电保护设备，其状态量数值的波动直接反映了继电保护装置健康状况，可以对继电保护装置运行状况进行量化的评价。

### 2.2.4 继电保护间隔状态评价

继电保护状态评价是以间隔为单位开展。对于单重化配置的继电保护，继电保护间隔包括继电保护装置和二次回路；对于双重化配置的继电保护，继电保护间隔包括双重化配置继电保护装置本体和二次回路。

对该间隔的所有继电保护装置以及二次回路的状态模拟量累加求和，进行状态评价。按照以上原则，得出继电保护装置状态评价得分 $K_d$ 以及二次回路状态评价得分 $K_e$ 。

$$K_d = \sum_{i=1}^n h_{di} \cdot S_{di} \quad (1)$$

$$K_e = \sum_{i=1}^n h_{ei} \cdot S_{ei} \quad (2)$$

式中： $h_{di}$ 、 $S_{di}$ 和  $h_{ei}$ 、 $S_{ei}$ 分别为该间隔状态评价项的装置与二次回路的健康因子和状态模拟量，将式(1)、式(2)进行累加，分别得出代表该继电保护装置状态评价得分  $K_d$  以及二次回路状态评价得分  $K_e$ 。

$$K = \min(K_d, K_e) \quad (3)$$

如式(3)所示，取继电保护装置状态评价和二次回路状态评价的最低分，作为本继电保护间隔的整体状态评价得分。

## 2.3 在线状态检修策略制定

根据继电保护间隔状态评价的结果，结合状态评价得分 $K$ ，制定出相应的状态检修策略。

如表3所示，按照继电保护间隔的状态评价结果，根据保护状态评价的得分 $K$ 值，将继电保护的运行状态分为五个不同的运行状态，分别给出不同

表 3 继电保护间隔状态检修策略表

保护间隔状态	检修周期	检修策略
良好( $K \geq 90$ )	基准周期+1年	巡视+C类检修
正常( $90 > K \geq 80$ )	基准周期	巡视+C类检修
注意( $80 > K \geq 70$ )	基准周期-1年	诊断性试验+ C类检修
异常( $70 > K \geq 60$ )	基准周期-2年	诊断性试验+ B类检修
严重异常( $K < 60$ )	立刻检修	诊断性试验+ A类检修

注：基准周期为5年，根据设备检修项目分为ABC类检修

的设备检修周期和 A、B、C 类检修策略建议。如对于状态评价分数  $K$  值在 60 分以下的设备, 应立刻安排检修, 并针对设备状态评价的具体诊断结果, 开展有针对性诊断性试验, 并安排设备 A 类检修。

### 3 继电保护装置在线状态检测

#### 3.1 在线状态检测

继电保护在线状态检测是继电保护在线状态检修的基础和核心。继电保护在线状态检修采集保护装置的环境温湿度、三相电流、三相电压、装置工作电源、ADC 基准电压和光纤通道光强等数据信息, 多元化和多渠道的保护状态数据构成了继电保护在线状态检修的主要数据基础。

#### 3.2 装置运行环境状态量检测

##### 3.2.1 环境状态量检测的必要性

研究表明, 继电保护装置的电子元器件的物理运行劣化特性与其所处的温湿度环境密切相关, 具体体现为性能指标下降、使用寿命缩短和热噪声增加等, 严重时甚至引起器件内部开路或短路等。以温度为例, 电子元器件的工作温度每上升  $10^{\circ}\text{C}$ , 其寿命将下降一半; 湿度也对其性能和寿命影响很大, 湿度的上升加快电化学腐蚀的过程, 最终导致半导体器件失效。

国调中心目前正在试点运行小型化和就地化的新型继电保护装置, 是继电保护发展的必然趋势。但是小型化的设备散热成为一个运行必须面临的难题; 就地化安装于一次设备带来的恶劣的运行环境, 必然会影响新型继电保护装置的工作。因此, 相比较于传统继电保护设备, 新型设备更要考虑温湿度等运行环境状态参数对新型继电保护装置运行的影响。

##### 3.2.2 环境状态参数数据的评价方法

目前部分新型继电保护装置内设置有温度和湿度传感器探测点, 可以通过采集装置的内部运行温度和湿度, 作为重要的状态评价参数, 通过 MMS 报文进行上送。

由于电子元器件的性能退化及失效是一个很复杂的过程, 而且不同类型器件的失效模型是不同的。可以通过聚类比较法和聚类趋势分析法进行分析。

##### 1) 聚类比较法

对于一类的继电保护装置, 可以采用如图 3 所示的聚类比较法进行分析。以温度状态量为例, 对继电保护装置进行温度状态量的数据采集, 汇总绘制各装置温升比较图, 选取最高温升的一个或几个装置, 将其状态评价为“需要注意”的检修对象。

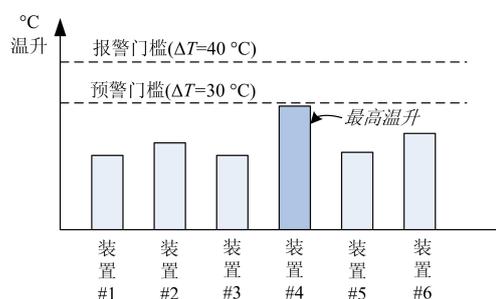


图 3 按照“比较法”得到的装置温升比较图

Fig. 3 Device temperature rise chart in accordance with the “comparison method”

聚类比较法要求的样本空间和类型比较大, 样本空间越大, 结果可信度越高。参与比较的保护装置可按设备间隔选取, 也可以按照设备类型、型号或者厂家选取。

##### 2) 聚类趋势法

对于单个的继电保护装置, 可以采用如图 4 所示的聚类趋势法进行分析。

以温度状态量为例, 通过收集分析某个装置的历史数据, 得到装置温升的趋势曲线。通过统计分析一段较长时期内装置内温升的变化, 得到装置整体性能变化的趋势, 作为继电保护状态检修的参考依据。

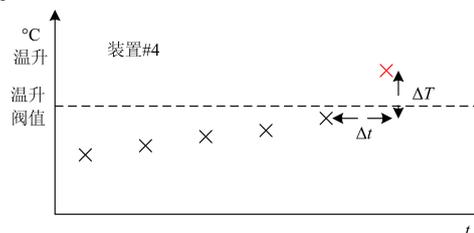


图 4 按照“趋势分析法”得到的装置温升趋势图

Fig. 4 Device temperature rise trend graph in accordance with the “trend analysis method”

如果温升在短时期内有较大的攀升, 则有可能装置出现硬件异常。如发现装置温升变化率  $(\Delta T / \Delta t)$  超过正常运行的阈值, 则发出告警, 将其状态评价为“需要注意”的检修对象。

### 3.3 光纤通信器件的状态检测

#### 3.3.1 变电站光纤回路状态检测

智能站和线路光纤保护装置广泛应用了光纤回路作为模拟量、开关量、通信和对时等功能实现的重要载体。传统的光纤通道检查方法需要断开光纤传输通道, 接入光功率测量设备, 光纤通信器件是环境敏感元件, 且在测量过程中需要插拔光纤连

接头, 容易使接头受到灰尘等污染; 或者因为接头的对位偏移, 导致光纤通道中出现额外的故障点, 影响光信号传输和实际的测量结果, 因此研究光纤回路在线状态检测技术非常必要。

### 3.3.2 光功率接收端状态在线检测

光信号的强度在光纤传输链路上受光的吸收、散射和辐射等因素的影响会有一些的损耗, 损耗主要产生在光纤的纤芯中、光纤连接法兰处以及光纤的熔接处。光功率接收端通信误码率(BER)和通道信噪比(Q)之间的关系可以用式(4)来描述。

$$BER \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (4)$$

由式(4), 可以得误码率与信噪比关系曲线, 如图5所示。

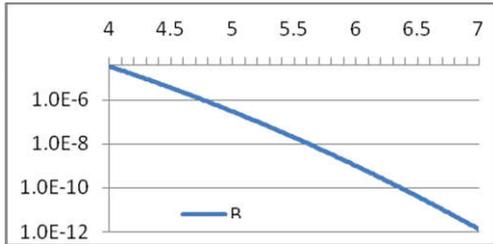


图5 信噪比 Q 与误码率 BER 的关系曲线  
Fig. 5 Relationship between Q and BER

如图5所示, 误码率随着信噪比的增大而减小。研究表明, 光强和通道信噪比(Q)成线性关系, 可以认为光通道误码率随着光强的增大而减小。

因此, 光纤回路接收端的收信光功率的强度反映了光纤通道的品质, 可以通过检测接受光通道来在线检测光纤通道的工作状态。

接收端光功率的检测如图6所示, 光电二极管对光强进行检测, 将光信号转换成为电信号。光功率  $P_{in}$  与流经光电二极管的电流大小成正比关系, 检测电路电流  $I_a$  与光电流(脉动电流)的平均值成正比,  $I_a$  流过采样电阻RS转换为电压信号。

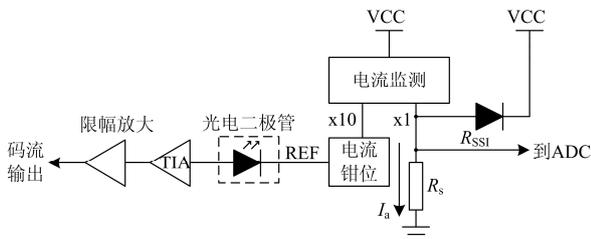


图6 接收光功率检测的硬件原理框图  
Fig. 6 Hardware block diagram of the received optical power detection

$$P_{in} \propto V_{RSSI} = I_a \times R_s \quad (5)$$

通过 ADC 通道采集 RS 采样电阻上的电压信号, 可以对接收端光功率进行在线检测。

### 3.3.3 光功率发送端状态在线检测

光纤通道的发送端光源的激光器是一个容易被忽视的环节, 也是光纤回路中的关键环节。温度、输出功率和工作电流三个参数与发送端光源的激光器工作状态直接相关。

这三个参数之间有复杂的相互作用, 总体上可以认为过温和过电流是光源器件失效的主要原因。温度的检测上文已有阐述, 对于光源器件主要通过检测工作电流来判断工作状态是否正常, 激光器工作电流检测的硬件原理如图7所示, 激光器的背光电流  $I_{pd}$  与激光器的工作电流  $I_{op}$  成正比。可以通过检测  $I_{pd}$  建立的  $V_{pd}$  电压获取激光器的发送端工作状态, 即通过采样ADC的输出电压  $V_o$  获得:

$$I_{op} \propto I_{pd} = \frac{V_{pd}}{R_s} = \frac{V_o}{R_s} \quad (6)$$

激光器状态评价可以采取设定  $I_{op}$  越限告警阈值, 一般可以根据激光器规格书中推荐参数设置取  $\Delta I_{op} = 30\% I_{op-normal}$ , 当  $I_{op}$  在规定时段内变化率过大则发出告警信息。

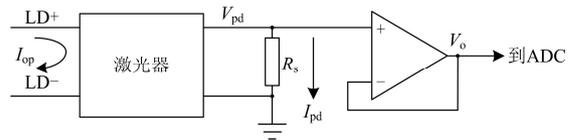


图7 激光器工作电流检测的硬件原理框图  
Fig. 7 Hardware block diagram of the lasers operating current detection

### 3.3.4 光纤通信器件的状态评价

通过采集分析光纤通信回路的收信光功率和激光器工作电流的状态, 对继电保护装置光纤回路的工作状态做出综合判断, 相关状态评价量上送至继电保护在线状态检修评价平台。

## 4 工程实践

继电保护在线状态检修智能决策系统目前已在安徽电网运维检修中投入应用。

其中, 具有在线状态检测功能的继电保护装置已经在220 kV港西变电站挂网运行, 该装置在传统状态量的基础上进一步完善了装置自检信息, 增加了温湿度检测和光纤通道状态检测等功能, 使其更好地满足继电保护在线状态检修的需求。

如图8所示, 继电保护在线状态检修智能决策

系统部署在省调控中心, 系统通过继电保护信息系统对变电站的继电保护设备状态数据进行实时在线采集, 同时对继电保护OMS和PMS基础台账和运维信息进行同步采集, 并完成继电保护在线状态评估、在线检修策略制定以及设备健康状态在线预警等一系列功能。

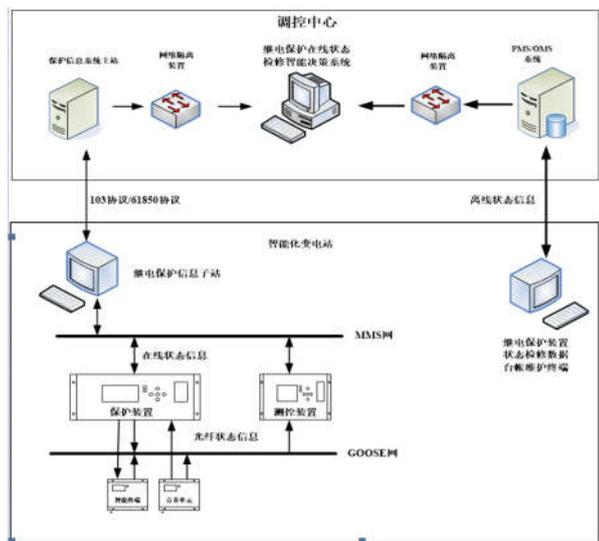


图8 继电保护在线状态检修系统结构

Fig. 8 Online condition-based maintenance system of protective relays

## 5 结语

继电保护在线状态检修在安徽电网实践中取得了较好的效果。1) 检修工作针对性大大加强, 年度继电保护设备检修工作量同比减少约28.5%, 现场作业人员得以将有限的检修力量集中投入到运行状态不佳的设备上, 提高了二次设备检修工作效率; 2) 提升了设备健康状况水平, 年度继电保护设备异常率同比下降约9.3%; 3) 真正达到了“应修必修”和“修必修好”的工作目标, 提高了电网的安全稳定运行水平。

## 参考文献

- [1] 李红宁. 基于可靠性分析的微机继电保护设备最佳检修周期研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 71-74.  
LI Hongning. Study on optimal maintenance cycle of digital relay based on reliability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 71-74.
- [2] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.  
XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology, 2000,

- [3] 宋人杰, 王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 54-57.  
SONG Renjie, WANG Xiaodong. Research on assessment and analysis system of condition-based maintenance for power transformation and transformation equipment[J]. Relay, 2008, 36(9): 54-57.
- [4] 安玲. 输电线路状态检修软件系统的面向对象设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 66-69.  
AN Ling. Object-oriented design and implementation of the state maintenance software system for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 66-69.
- [5] 黄建华, 全零三. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 56-61.  
HUANG Jianhua, QUAN Lingsan. Current status and development of condition-based maintenance of high-voltage electric power equipment in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 56-61.
- [6] 李常儒. 电力设备诊断技术概论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [7] 《半导体器件可靠性》编写组. 半导体器件可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [8] 周正伐. 可靠性工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006.
- [9] 王睿琛, 薛安成, 毕天姝, 等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 11-15.  
WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15.
- [10] HOWES M J, MORGAN D V. 半导体器件及电路的可靠性与退化[M]. 李锦林, 译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [11] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 148-153.  
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. Online state detection and fault diagnosis technology of relay protection secondary circuits in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 148-153.
- [12] 邱金辉, 钱海, 张道农, 等. 基于PFIS的继电保护常态特性在线监视与隐性故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 145-149.  
QIU Jinhui, QIAN Hai, ZHANG Daonong, et al. Online monitoring of normal behavior and diagnosis of hidden failures in protection system based on PFIS[J]. Power

- System Protection and Control, 2015, 43(8): 145-149.
- [13] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.  
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [14] 丁修玲, 张延旭, 蔡泽祥, 等. 基于报文解析的变电站过程层网络信息流异常保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 58-63.  
DING Xiuling, ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, et al. A protection method of abnormal information flow in process layer network based on packet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 58-63.
- [15] 李峰, 谢俊, 赵银凤, 等. 基于IEC61850的智能变电站交换机IED信息模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 76-80.  
LI Feng, XIE Jun, ZHAO Yinfeng, et al. IEC61850 based information model of switch intelligent electronic device for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 76-80.
- [16] 王德文, 邸剑, 张长明. 变电站状态监测IED的IEC 61850信息建模与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 81-86.  
WANG Dewen, DI Jian, ZHANG Changming. Information modeling and implementation for status monitoring IED in substation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 81-86.
- [17] 袁浩, 屈刚, 庄卫金, 等. 电网二次设备状态监测内容探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 100-106.  
YUAN Hao, QU Gang, ZHUANG Weijin, et al. Discussion on condition monitoring contents of secondary equipment in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 100-106.
- [18] 王治民, 陈炯聪, 任雁铭, 等. 网络通信记录分析系统在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 92-95.  
WANG Zhimin, CHEN Jiongcong, REN Yanming, et al. Application of network communication recorder and analyzer in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 92-95.
- [19] 许伟国, 张亮. 数字化变电站网络通信在线故障诊断系统的设计与应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 121-124.  
XU Weiguo, ZHANG Liang. Design and application of on-line fault diagnosis system for network communication of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30 (6): 121-124.
- [20] 许伟国, 蒋晔, 张亮, 等. 数字化变电站中网络通信黑匣子的设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 92-94.  
XU Weiguo, JIANG Ye, ZHANG Liang, et al. Design and application of the network communication black box in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 92-94.
- [21] 朱林, 王鹏远, 石东源. 智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 87-92.  
ZHU Lin, WANG Pengyuan, SHI Dongyuan. Status monitoring information model and configuration description of communication network in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 87-92.

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-09-24

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 工学硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 13905608638@139.com

(编辑 葛艳娜)