

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190617

## 智能变电站继电保护在线运检方法研究

刘琨<sup>1,2</sup>, 黄明辉<sup>1,2</sup>, 李一泉<sup>1,2</sup>, 刘玮<sup>1,2</sup>, 陈桥平<sup>1,2</sup>, 王增超<sup>1,2</sup>, 王育学<sup>1,2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600)

**摘要:** 随着信息与通信技术在继电保护系统中的应用不断加深, 基于高度信息开放背景下的在线运检成为了提升继电保护系统运维有效性的新模式。首先论证传统运检的有效性和充分性。围绕继电保护全面实时状态评估和可靠有效运检的目标, 提出全景信息开放和在线运检的需求。然后全面梳理评估继电保护状态所需的状态信息集, 探讨状态信息集的构成及获取方式, 提出基于不同类别状态信息的在线运检方法, 从而构建在线运检系统的架构, 综合利用状态信息发现继电保护的异常。最后, 结合传统运检与在线运检提出继电保护新模式的构想。

**关键词:** 继电保护; 定检; 全景信息开放; 在线运检; 状态评估

### Research on online operation method for protective relay of smart substation

LIU Kun<sup>1,2</sup>, HUANG Minghui<sup>1,2</sup>, LI Yiquan<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Qiaoping<sup>1,2</sup>, WANG Zengchao<sup>1,2</sup>, WANG Yuxue<sup>1,2</sup>

(1. Power Dispatch Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Key Lab for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** As the information and communication technology is widely used in the relay protection system, online maintenance method, which is based on highly information sharing, has become a new mode to improve the efficiency of relay protection maintenance. Firstly, this paper analyzes the efficiency and sufficiency of conventional maintenance method. Aiming to achieve overall and real-time state assessment as well as reliable and efficient relay protection maintenance, the demand of panoramic information and online maintenance is proposed. Furthermore, state information set and its composition and obtain way are discussed in this paper, while different online maintenance methods according to different categories of state information are also proposed. Based on the above information sets, this paper proposes an online maintenance system which can discover many faults of relay protection. Finally, considering both conventional and online maintenance methods, this paper describes a new mode for relay protection maintenance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577073) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20184472).

**Key words:** relay protection; periodical maintenance; panoramic information; online maintenance; state assessment

## 0 引言

继电保护有效的运维检修是保障其安全可靠运行的基础, 现行的继电保护传统运检方法存在工作量大、有停电风险以及有效性存疑等弊端。随着智能变电站和继电保护装置信息开放及共享程度的提高<sup>[1]</sup>, 继电保护系统支持连续监测关键的状态信息, 并支持以通信的方式输出这些信息<sup>[2-3]</sup>, 利用多

种自动化手段和计算机技术集中存储、综合分析、统一展现<sup>[4]</sup>, 利用冗余信息还能加强信息准确性, 将有效提高保护的效能<sup>[5]</sup>。

信息开放程度的提高使得突破传统运检模式瓶颈的继电保护在线运检模式成为可能<sup>[6]</sup>。文献[7]提出了一个智能变电站在线运维系统, 其中数据分析层综合利用各种报文信息, 文献[8]提出了智能变电站继电保护状态检修监测的关键信息, 并介绍了实际工程应用的监测流程。文献[9]提出了包括二次设备自检信息在内的二次系统状态监测内容, 可以为继电保护在线运检的监测信息提供参考。但是目

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51577073); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20184472)

前仍缺乏综合利用开放信息的系统的继电保护在线运检方法<sup>[10-25]</sup>, 所需的信息也没有经过充分论证分析。

本文通过论证传统继电保护运检模式的有效性和充分性, 提出全景信息开放和在线运检的需求, 基于该需求提出全面评价继电保护系统状态所需的状态信息集, 并探讨其构成和获取方式。通过分析不同类别状态信息的特点提出基于全景信息开放的在线运检方法, 以此为基础构建在线运检系统的架构。最后提出继电保护未来运检新模式的展望。

## 1 继电保护传统运检模式

### 1.1 传统运检模式有效性分析

继电保护的传统的运检模式主要包括巡视和定检, 定检包括部检和全检, 继电保护系统的第一次部检是投入后第三年进行的, 全检是投入后第六年进行, 此后每三年交替进行部检和全检。各项运检项目均严格按照运检指导书设定的检查步骤进行。只要检验结果符合检查标准, 即可初步认为所检验部分功能正常; 若检验结果不符合标准, 则可以发现继电保护各部分及其二次回路存在的缺陷。

然而, 定检过程中不可避免的长时间停电、工作量繁重的检查以及频繁插拔接线等已经成为影响继电保护运行可靠性的因素, 传统运检模式亟待改进提升。表 1 列举了继电保护传统运检模式的内容与存在的问题。

表 1 继电保护传统运检模式

类别	主要运检内容	状态信息获取方式	周期	存在问题
巡视	环境外观检查、直流电源状态检查等	人工巡视、记录、比对	日常巡视每日一次, 专业巡视每季度一次	运维工作量大, 并不能实时分析继电保护的状态
定检	保护装置功能检查、各项回路检查	人为加量、测量	通常为“三年一部检, 六年一全检”	工作量繁重, 大部分情况需要停电

运检的目的是要准确评估继电保护系统的状态。继电保护系统作为一个整体, 正常运行时各保护功能应当满足一定的系统性约束。同时继电保护系统又是由各个设备及其回路组合而成, 这就意味着单个设备和回路的性能优劣必然会影响整个系统的功能。

因此, 继电保护系统的状态主要可以从两个维度来评价: 维度 1 为继电保护功能状态, 若该继电

保护系统功能正常, 则可以认为该继电保护系统状态良好, 具体体现为保护满足“四性”要求。维度 2 为继电保护系统的设备和回路状态, 若该继电保护系统的设备和回路状态正常, 则可以认为该继电保护系统状态良好。受制于测试场景等原因, 基于任一维度的状态评价都是有漏洞的, 为了弥补这个漏洞不得不参考另一个维度的相关测试结果, 因此必须结合两个维度的评价结果综合判断。

在继电保护信息开放不够完全的情况下, 为了实现继电保护系统的状态评价, 传统运检模式按照一定的时间周期进行。如图 1 所示, 各项运检项目在不同的时间断面内从不同的维度出发评价继电保护系统的状态。

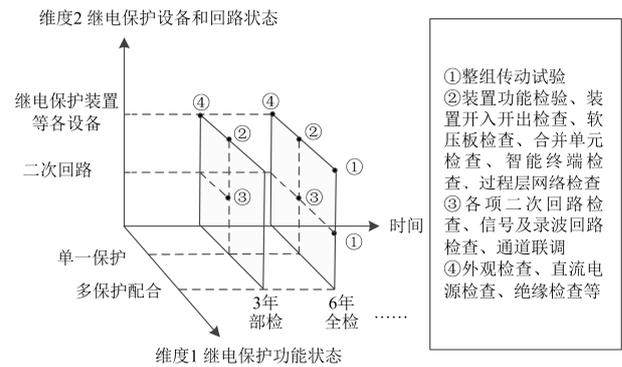


图 1 继电保护状态评价维度

Fig. 1 State evaluation dimensions for relay protection

### 1.2 传统运检模式充分性分析

继电保护的部检具体是以单一间隔内的各个保护功能为单位进行的(母线保护除外)。根据图 1 分析, 传统运检模式在部检时: 1) 能反映单一间隔内加量时本间隔保护功能的好坏, 但不能反映相邻间隔加量时本间隔的保护响应情况。2) 能反映单一保护元件的状态, 但不能反映不同保护元件间的响应配合情况。如主保护动作时后备保护的响应情况和动作时限的校验, 以及主后备保护的时序配合。3) 通常无法检验出保护原理中的异常。

传统运检全检时能较全面地获取继电保护系统的各类状态信息, 其中整组传动试验主要从维度 2 的角度整体评价继电保护的整体功能是否正常, 还能通过模拟区外故障校验本间隔保护的选择性。

综上所述, 传统定检模式虽然能较全面地从两个维度评价继电保护状态, 但在较长的时间间隔内不能校验多保护之间是否正常配合, 也不能反映保护原理本身的正确性。因此传统运检模式对继电保护系统状态的评价是不充分的。

## 2 继电保护状态信息集

### 2.1 全景信息开放的需求分析

传统运检模式对继电保护状态的评价是不完全的。另外，由于每次定期检验的时间间隔较长，继电保护的状态并不能被实时监控。因此，基于全面且实时评价继电保护系统状态的需求，全景信息开放成为了提升继电保护运检有效性的重要前提。

全景信息开放指的是开放所有评价继电保护系统状态所需要的信息。根据继电保护检验规范梳理出继电保护状态信息主要包括两个部分：运行状态信息和设备状态信息。从维度 1 的角度评价继电保护系统的状态时，需要获取运行状态信息，这部分信息通常由一次系统故障激励继电保护动作而产生，主要涉及到保护装置的动作情况。从维度 2 的角度出发，则需要获取设备状态信息，这部分信息

主要反映继电保护系统各个设备和回路的情况。综合两个维度评价时，则需要同时获知必需的运行状态信息和设备状态信息。

如果要全面评价一个继电保护系统的状态，除了需要开放上述两部分信息外，还得增加传统运检项目没有涉及到的内容，本文称这部分信息为保护配置信息。保护配置信息能够描述继电保护内部、不同间隔间以及不同变电站继电保护之间丰富的信息关联关系，利用这些关联关系可以辨识错误信息，实现继电保护运行状态的评价。

### 2.2 继电保护状态信息集

本文将全景信息开放的信息总和称为继电保护状态信息集，包括运行状态信息集、设备状态信息集和保护配置信息集。如表 2 所示为设备状态信息集和运行状态信息集，表 3 为针对传统运检状态评价盲区所增加的保护配置信息集。

表 2 设备状态信息集与运行状态信息集

Table 2 Information set for equipment status and operation status

设备状态信息集						运行状态信息集			
继电保护部分	设备状态信息	信息类别	继电保护部分	设备状态信息	信息类别	继电保护部分	运行状态信息	信息类别	
配置文件	配置文件版本号	b	保护装置	湿度	a	合并单元	模拟量采样值	a	
保护装置	硬件版本号	b		过程层网络	时间信息	b	智能终端	开关量状态	c
	软件版本号	b		光纤纵联通道	网络流量、网络延时	a	保护装置	其他开入状态	c
	装置温度	a			丢包率、误码率	b		测量值	e
	整定值/定值区号	b			断链告警信息	c		选相结果	c
	直流电源电压	a		联通道	光功率、通道延时	a		保护启动状态	c
	逆变电源启动次数	b			通道 3dB 告警信息	c		保护动作状态	c
	BSJ 硬接点信号	c		压板	硬压板状态	d		重合闸动作状态	c
	BJJ 硬接点信号	c			软压板状态(智能变电站)			失灵启动状态	c
	充电状态	c		操作箱	控制回路断线硬信号	c		差动保护的差流	a
告警信息	c	通信中断信息	c		保护跳闸命令	c			
温度	a	电源指示灯	c		操作箱	TWJ/HWJ 继电器状态	c		

表 3 保护配置信息集

Table 3 Informationset for protection configuration

保护配置信息	用途
保护元件保护范围	用于确定主后备保护的范围和确定保护范围的重叠区
保护所属变电站 保护所属间隔 保护所连接的母线	用于确定一次系统架构和每个间隔配置的保护
保护之间的配合关系	区外故障时主、后备保护与下级线路保护的配合 区内故障时主、后备保护间的配合
设备之间的信息关系	用于确定设备间的信息冗余关系和关联关系
中间继电器动作状态	用于确定保护逻辑分析和跳闸出口经过的环节及其状态

## 3 继电保护在线运检模式

在线运检则主要通过开放继电保护系统的全景信息来实时监测其运行状态和设备状态，可以更充分完整地评价继电保护状态，同样从两个维度出发来评价继电保护系统的状态。为了得到继电保护状态信息集，在线运检试图将传统运检的信息获取方式转变为在线实时获取，因此在线运检可以实现不停电校验继电保护状态，减少了因停电而带来的可靠性风险。

### 3.1 在线运检模式与传统运检模式的异同

在线运检是基于传统运检发展而来的，两者有相同点，也有诸多不同之处，如图 2 所示。

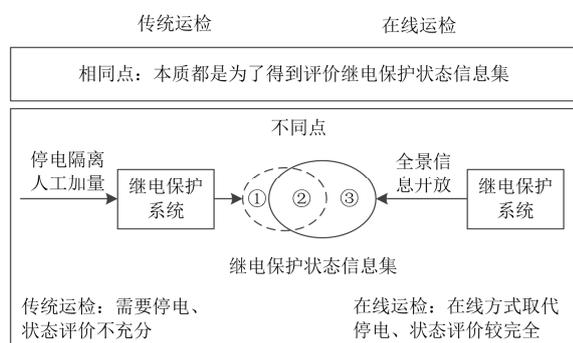


图 2 传统运检与在线运检对比

Fig. 2 Comparison between conventional maintenance and online maintenance

1) 从本质上来说传统运检与在线运检殊途同归, 两者的本质都是为了得到评价继电保护状态信息集, 从而可以为继电保护的状态评估和故障分析等提供依据。

2) 从原理上来说, 传统运检把继电保护系统看作一个黑匣子, 通过人工加量的方式给这个黑匣子施加激励, 然后通过收集和测量输出的状态信息评价继电保护的状态。在线运检则利用继电保护系统的全景信息来实现继电保护系统状态的评价。

3) 从继电保护状态信息集来说, 两者得到的信息集略有不同, 图中①指的是传统运检特有的信息, 主要指的是无法通过在线方式实现的传统运检项目所得到的信息, 本文称这些项目为传统运检保留项目, 包括外观检查、回路绝缘电阻检查、寄生回路检查和端子紧固; ②指的是可以通过传统运检或在线运检获得的信息集, 对应于本文表 2; ③指的是利用在线运检方法新增的信息, 对应于本文表 3。

4) 从继电保护状态信息集的获取方式来说, 传统运检主要通过继电保护系统增加激励而获得响应状态信息, 在线运检则在线获取继电保护上送的各类状态信息。

### 3.2 基于全景信息开放的在线运检方法

为了充分利用继电保护状态信息集, 本文提出基于全景信息开放的在线运检方法。本文提出的在线运检方法主要基于三方面实现: 基于设备状态信息的在线运检、基于运行状态信息的在线运检和基于保护配置信息的在线运检。

#### 3.2.1 基于设备状态信息的在线运检方法

如表 2 所示, 设备状态信息包括软硬件版本号、定值、时间信息等。在基于全景信息开放的前提下, 这部分信息可以由智能设备实时连续可测并开放。

对于设备状态的在线运检往往只需利用单一设备的信息, 这部分信息相互之间较为独立, 若要

基于这部分信息实现在线运检, 基本思路是将这些信息与自身历史数据进行对比或与阈值进行对比。

设备状态信息主要分成四类, 如表 2 所示 a、b、c、d, 下面分别介绍这四类信息的在线运检方法。

#### a. 偏移比较

该类信息主要为模拟量类型的信息, 这类信息可以先计算出相对于额定值的偏移量, 然后与阈值进行比较得出结论。其中:

$$\Delta X_{\text{偏移量}} = \frac{X_{\text{实测量}} - X_{\text{额定量}}}{X_{\text{额定量}}} \quad (1)$$

$$(\Delta X_{\text{偏移量}} \geq \Delta X_{\text{阈值}}) = \begin{cases} 0, (\text{正确}) \\ 1, (\text{异常}) \end{cases} \quad (2)$$

#### b. 阈值比较

该类信息的在线运检思路是直接和阈值进行比较即可, 因此无需计算偏移量, 采用计算方式如式(2)所示, 其中偏移量由实际监测信息代替, 此处不再赘述。

#### c. 异常告警

该类继电保护状态信息直接向运维人员展示。

#### d. 一致性比较

压板状态类状态信息的监测思路是实际状态与记录状态一致时状态正常, 否则状态异常。定义一种运算“ $\oplus$ ”, 使得当  $x$  和  $y$  不同时,  $x \oplus y = 1$ 。则有:

$$\text{实际状态} \oplus \text{记录状态} = \begin{cases} 1, (\text{状态异常}) \\ 0, (\text{状态正常}) \end{cases} \quad (3)$$

#### 3.2.2 基于运行状态信息的在线运检方法

如表 2 所示, 运行状态信息包括交流采样值、开关量、保护动作结果、主后备保护配合结果等。在基于全景信息开放的前提下, 这部分信息可以在智能设备运行状态下实时可测并开放。

对于运行状态的在线运检不仅需要利用单一设备的信息, 部分还需要利用跨间隔的信息。基本思路与设备状态在线运检方法类似。

运行状态信息主要有三类, 如表 2 所示 a、c、e, 其中 a 和 c 类信息的在线运检方法如上述相同, 下面介绍 e 类信息的在线运检方法。

#### e. 逻辑分析

测量值信息的在线运检思路如下所示:

$$\left( \frac{\text{测量值}}{\text{整定值}} > 1 \right) = \begin{cases} 1, (\text{理论上启动状态}) \\ 0, (\text{理论上不启动状态}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{实际启动状态} \oplus \text{理论启动状态} = \begin{cases} 1, (\text{状态异常}) \\ 0, (\text{状态正常}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2.3 基于保护配置信息的在线运检方法

为了评价各个保护之间的配合是否正常以及更完善地评估继电保护各个状态是否正常，需要开放表 4 所示的保护配置信息。基于保护配置信息的在线运检方法思路如图 3 所示。

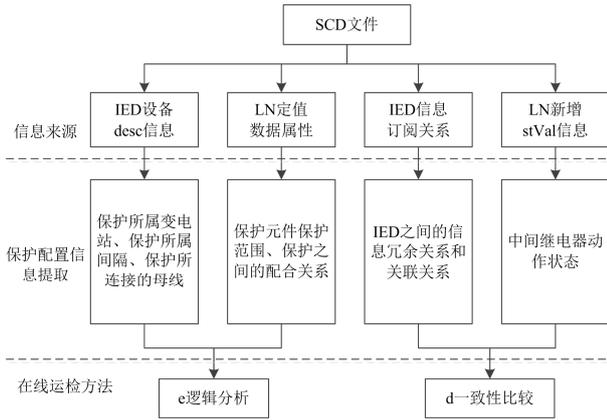


图 3 基于保护配置信息的在线运检方法思路

Fig. 3 Online maintenance method based on protection configuration information

智能变电站的全站配置文件(SCD 文件)采用能够描述该变电站一次系统结构、所有 IED 的实例配置信息和所有 IED 间虚端子通信关系与互连信息等。因此本文利用 SCD 文件中的各类信息提取出保护配置信息并实现在线运检。

#### 1) IED 设备 desc 信息

通过解析 SCD 文件中各 IED 的 desc 信息可以获知该 IED 的命名、设备类型等，从而获得各间隔保护配置的情况。如：<IED desc="500 kV 5011 开关测控-NSD500">表示该 IED 设备为一个开关测控装置，而且是 500 kV 变电站第一条线路的第一个开关测控装置，因此根据 SCD 文件可以获知所有 IED 设备与一次系统的关联关系。

#### 2) LN 定值数据属性

通过解析保护逻辑节点 LN 的定值数据属性可以间接得到保护元件的保护范围以及保护之间的配合关系。

#### 3) IED 设备信息之间的订阅关系

通过解析每个 IED 设备的 SV 和 GOOSE 报文订阅关系可以描绘出 IED 之间的虚回路，从而可以得到大量的信息冗余关系和关联关系。例如，根据 SCD 文件可以得到某一线路的保护设备和测控设备均需要接受来自该线路智能终端的开关量 GOOSE 报文，因此这两个设备的开关量信息之间存在冗余关系。

#### 4) LN 新增数据属性

若智能设备支持开放中间继电器的动作状态，可以通过新增相关逻辑节点的数据属性得到保护配置信息。例如，可以扩展过流保护逻辑节点 PTOC 的选相元件属性 PhSel，通过监测 PTOC.PhSel.StVal 的值得到选相元件的动作情况。

通过解析 SCD 文件得到保护配置信息后，可以直接利用上述逻辑分析和一致性比较的在线运检方法，这些信息涉及到的均为运行状态信息。

1) 保护所属间隔和保护元件保护范围等信息可以用于继电保护运行状态的评价。利用区内、外故障的有效激励结合定值信息得到正确的理论保护启动状态，再与实际保护启动状态比较判断状态信息正常与否，分析方法与式(4)和式(5)相同，此处不再赘述。

2) IED 之间的信息关系可以丰富继电保护的信息冗余关系，利用这些冗余关系可以评价交流采样值、开关量开入值的正确性，分析方法与式(3)相同，此处不再赘述。

3) 中间继电器的动作状态可以通过一致性比较进行在线运检，分析方法与式(3)相同，此处不再赘述。

### 3.3 基于全景信息开放的在线运检系统

为了综合运用上述在线运检方法，本文提出一个基于全景信息开放的在线运检系统，如图 4 所示。

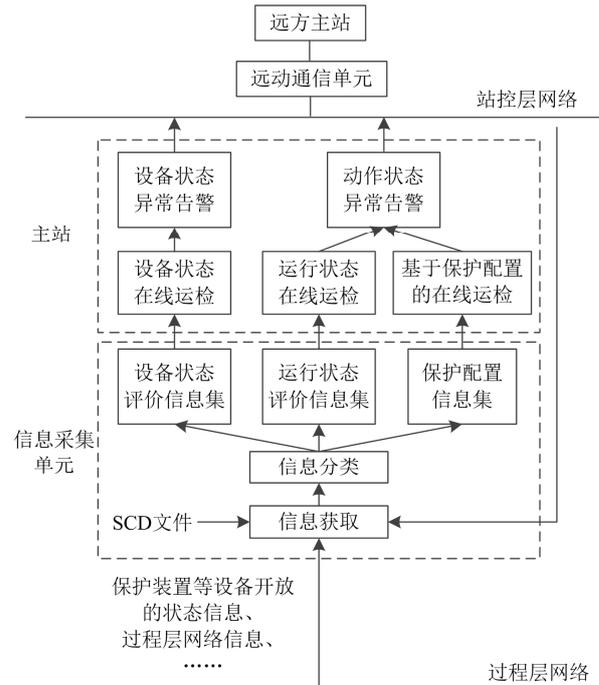


图 4 在线运检系统架构示意图

Fig. 4 Architecture of online maintenance system

在线运检系统主要分为主站和信息采集单元, 整个系统跨接在站控层和过程层, 可以实时采集到各个间隔层设备、一次设备、过程层网络、站控层网络的设备状态信息和运行状态信息, 并且可以通过输入 SCD 文件得到保护配置信息。主站是整个系统的分析和指挥中心, 信息采集单元为主站提供所需的状态信息。

在线运检系统可以综合利用全景开放的所有信息, 通过对信息分类得到设备状态信息集、运行状态信息集和保护配置信息集。每一个信息集内的信息都有若干类别, 基于不同的类别分别对应不同的在线运检方法, 可以发现不同的状态异常, 从而全面实时地保障继电保护系统的正常运行。

### 3.4 继电保护运检新模式

传统运检虽然有种种弊端, 但并不是所有传统运检项目都可以被某些在线运检方法所取代, 在线运检相对于传统运检而言也有评价盲区。因此亟待建立继电保护运检新模式, 以弥补两种运检方法的缺陷, 发挥各自的优势。基于信息共享的继电保护新体系, 结合传统运检与在线运检的异同点, 本文尝试探索继电保护运检的新模式。

如图 5 所示, 当一次系统无故障的情况下, 信息采集单元根据站控层、过程层以及 SCD 文件获取状态信息, 主要为设备状态信息, 并根据这些信息实现继电保护的设备在线运检, 如果有设备异常则发送异常告警信息; 而对于装置外观、回路绝缘电阻等无法通过在线运检实现的日常巡视和定检项目, 仍然按照“每日一次日常巡视, 每三年一次定检”的周期进行。

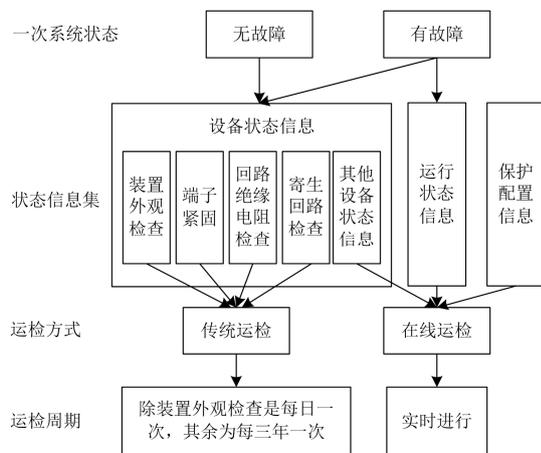


图 5 继电保护运检新模式示意图

Fig. 5 New mode for relay protection maintenance

当一次系统发生故障时, 继电保护应该正确动作, 此时信息采集单元主要采集继电保护系统的各

类运行状态信息, 并结合保护配置信息, 以在线运检为基础综合评价继电保护系统的运行状态。

## 4 结论

本文通过分析比较传统运检的实现方式与本质, 从全景信息的角度全面梳理评估继电保护状态所需的状态信息, 并探讨了信息的来源、获取方式和分类, 按照分类有针对性地提出了各类在线运检方法。

在本文提出的在线运检系统架构基础上, 广东某公司电力调度控制中心与南京某公司合作并研发了一套继电保护在线管控系统<sup>[26-27]</sup>。该系统以继电保护“免定检, 自维护”为诉求。通过采集的继电保护状态信息分析是否存在异常并告警, 能够自动完成继电保护大部分运维工作, 目前该已经在某地区变电站试投运, 运行结果表明, 人工参与的专业巡视、定检、日常巡视的项目数量分别降低了100%、90.9%、64.3%, 实现了继电保护运维由依赖人工、现场、离线、离散向系统自动巡检、远程、实时、连续的转变。系统可以极大地减少传统运维工作量, 有效提升智能变电站的实质性效益。

## 参考文献

- [1] ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analytical modeling of traffic flow in the substation communication network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2119-2127.
- [2] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.  
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments/state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [3] 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.
- [4] 孙继经, 徐光亮, 刘伟. 变电站程序操作远程监控系统的设计与应用[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 97-102.  
SUN Jijing, XU Guangliang, LIU Wei. Design and application of program operation remote monitoring

- system in substations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 97-102.
- [5] 和敬涵, 刘琳. 基于冗余信息的智能变电站协同后备保护及故障预判算法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(2): 3-8, 22.  
HE Jinghan, LIU Lin. Study of coordinated backup protection and fault forecast algorithm based on redundant information for smart substations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2): 3-8, 22.
- [6] 鲁东海, 孙纯军, 王晓虎. 智能变电站中在线监测系统的设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 134-137.  
LU Donghai, SUN Chunjun, WANG Xiaohu. Online monitoring system for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 134-137.
- [7] 笃峻, 叶翔, 葛立青, 等. 智能变电站继电保护在线运维系统关键技术的研究及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 163-168, 175.  
DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 163-168, 175.
- [8] 文继锋, 盛海华, 周强, 等. 智能变电站继电保护在线监测系统设计与应用[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1): 21-24, 29.  
WEN Jifeng, SHENG Haihua, ZHOU Qiang, et al. Design and application of relay protection on-line monitoring system in the intelligent substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(1): 21-24, 29.
- [9] 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.
- [10] 刘琨, 董新洲. 一种基于本地信息的自适应过负荷保护方案[J]. 广东电力, 2015, 28(4): 45-50.  
LIU Kun, DONG Xinzhou. Self-adaptive overload protection scheme based on local information[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(4): 45-50.
- [11] 郭升, 童晓阳, 王洪彬, 等. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 97-104.  
GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin, et al. Reliability evaluation method of intelligent substation protection system considering equipment aging and planned maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 97-104.
- [12] 肖繁, 王紫薇, 张哲, 等. 基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 74-83.  
XIAO Fan, WANG Ziwei, ZHANG Zhe, et al. Research on maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 74-83.
- [13] 刘琨, 曹润彬, 董新洲. 避免事故过负荷条件下远后备保护不合理动作的解决方案[J]. 广东电力, 2015, 28(7): 78-83.  
LIU Kun, CAO Runbin, DONG Xinzhou. Solution to avoid unreasonable action of remote backup protection under post-fault overload condition[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(7): 78-83.
- [14] 笃峻, 张海宁, 柏杨, 等. 智能变电站设备状态监测系统通信关键技术及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 151-156.  
DU Jun, ZHANG Haining, BAI Yang, et al. Key technology of communication and its implementation for equipment status monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 151-156.
- [15] 张延旭, 蔡泽祥, 龙翩翩, 等. 智能变电站通信网络实时故障诊断模型与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1851-1857.  
ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, LONG Pianpian, et al. Real time fault diagnosing models and method for communication network in smart substation[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1851-1857.
- [16] 刘琨, 董新洲. 基于本地信息预防连锁跳闸的集成保护实现方案[J]. 广东电力, 2015, 28(9): 79-84.  
LIU Kun, DONG Xinzhou. Realization schemes for integrated protection based on local information preventing interlock tripping[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(9): 79-84.
- [17] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.  
WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [18] 刘琨, 董新洲. 基于本地信息预防连锁跳闸的快速控制策略生成方法[J]. 广东电力, 2013, 26(3): 19-25.  
LIU Kun, DONG Xinzhou. Fast control strategy generation method based on local information for prevention of intertripping[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(3): 19-25.
- [19] 刘琨, 董新洲, 薄志谦. 适用于配电线路无通道保护的备用电源自动投入装置[J]. 电力自动化设备, 2013,

- 33(6): 147-151.
- LIU Kun, DONG Xinzhou, BO Zhiqian. Automatic switchover device adaptive to distribution line non-communication protection[J]. Electric power Automation Equipment, 2013, 33(6): 147-151.
- [20] 刘琨, 董新洲, 李幼仪. 双回线无通道集成保护的实现方案[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 11-16.
- LIU Kun, DONG Xinzhou, LI Youyi. The implementation of non-communication integrated protection of double circuit line systems[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(4): 11-16.
- [21] 陈创, 陈文睿, 李津. 面向继电保护系统级测试的缺陷自动定位方法[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 10-16.
- CHEN Chuang, CHEN Wenrui, LI Jin. Automatic defect locating method for relay protection systematic testing[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 10-16.
- [22] 陈洁羽, 谈震, 贺晓, 等. 传统选相元件在风电集中接入系统中的应用研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 27-32.
- CHEN Jieyu, TAN Zhen, HE Xiao, et al. Application of traditional phase selector in wind power centralized access system[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 27-32.
- [23] 陈洁羽, 谈震, 刘俊, 等. 风电电源阻抗特性对相量式距离保护的影响分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 63-68.
- CHEN Jieyu, TAN Zhen, LIU Jun, et al. Influence of impedance characteristics of wind power supply on phasor-based distance protection[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 63-68.
- [24] 邵振国, 林坤杰, 陈锦植, 等. 基于区间运算的谐波用户典型工况分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 153-160.
- SHAO Zhenguo, LIN Kunjie, CHEN Jinzhi, et al. Typical modes analysis of harmonic customers based on the interval arithmetic[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 153-160.
- [25] 屈志坚, 陈鼎龙, 巩奇. 配电网监测大数据的 Impala 快速查询技术[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 148-156.
- QU Zhijian, CHEN Dinglong, GONG Qi. Fast query technology for monitoring big data of distribution network based on Impala[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 148-156.
- [26] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站故障信息模型与继电保护在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 210-216.
- LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Fault information model and online monitoring method for relay protection system in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 210-216.
- [27] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 基于状态信息关联关系的智能变电站继电保护在线监测方法[J]. 现代电力, 2017, 34(6): 85-91.
- LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Online monitoring method for relay protection in smart substation based on state message relationships[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 85-91.

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-07-15

作者简介:

刘 琨(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护专业管理和电力系统数字仿真工作。E-mail: tjulk@126.com

(编辑 葛艳娜)