

DOI: 10.7667/PSPC150510

智能变电站二次设备状态监测研究综述

蔡骥然^{1,2}, 郑永康¹, 周振宇², 刘明忠¹, 孟雷¹, 陈迟¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 信息共享和设备之间的可互操作性作为智能变电站的主要特点, 可提供丰富的二次设备运行及状态信息, 给二次设备的状态监测和状态检修带来了极大的便利。但目前针对二次设备的状态监测的研究如交换机信息建模还存在着不足。在此背景下, 首先探讨了智能变电站二次设备状态监测的概念和监测对象, 其次分析了信息建模和监测数据分析处理方面的关键技术和方法, 并针对交换机和网络拓扑给出了一种建模方案。随后总结了几种利用状态监测数据进行二次设备故障诊断的方法, 并分析了各种方法的优点、不足以及适用场合。最后, 结合目前国内二次设备状态监测的研究和实际应用现状, 展望了未来的研究方向和应用前景。

关键词: 智能变电站; 二次设备; 状态监测; 信息建模; 故障诊断

A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation

CAI Jiran^{1,2}, ZHENG Yongkang¹, ZHOU Zhenyu², LIU Mingzhong¹, MENG Lei¹, CHEN Chi¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

2. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the leading features in smart substations, information-sharing and interoperability can provide rich information about operation and condition of secondary devices, which greatly facilitates secondary device condition monitoring and its condition-maintenance. However, it is still insufficient in current research such as information modeling of switches. This paper firstly discusses the concept and object of secondary device condition monitoring. Then the key techniques and methods of information modeling and monitoring data analysis and processing are summarized. Besides, a switch and a network topology modeling are proposed. Several methods with their advantages, shortcomings and suitable occasion of secondary device fault diagnosis using condition monitoring data are also summarized and compared. At last, considering current research and application situation of secondary device condition monitoring, future research directions and potential applications are discussed.

Key words: smart substation; secondary device; condition monitoring; information modeling; fault diagnosis

0 引言

近年来, 随着我国输变电技术的发展, 电网规模在不断扩大, 输变电电压等级在不断提高。这使得电力设备的数量和复杂性不断上升, 设备的检修费用占电网运行总成本的比例日渐增大, 继电保护设备的维护工作量急剧增加。为确保在这种设备数量多、设备复杂性高的情况下电网的稳定可靠运行, 同时控制检修费用以降低成本, 减少继保检验的工作量, 电力设备的检修策略也从过去的定期检修向状态检修发展。

定期检修和状态检修都属于预防性检修^[1]。定

期检修的缺点在于检修周期相对固定, 不能根据设备的健康状况及时地进行检修, 容易造成检修不足和检修过剩等问题^[2]。而状态检修是通过先进的状态监测手段获取设备工作时的各项状态参数, 根据这些状态参数反映出的设备实际工作状况, 识别故障的早期征兆, 对故障部位、故障严重程度及发展趋势做出判断, 从而确定设备的最佳维修时间的一种检修方式^[3]。

国家电网公司从 2006 年开始在各省市全面推行状态检修工作。主要完成的工作有: 制定状态检修技术标准、完善状态监测诊断分析手段、状态检修准备工作评价验收、基层人员状态检修知识及技

能培训^[4]。南方电网公司也于 2010 年发布了《输变电设备状态检修管理办法》以规范输变电设备的状态检修工作。目前, 我国的状态检修工作正处于初级阶段, 还存在着以下问题: 部分人员对状态检修认识还不够充分; 运行人员对设备状态的诊断、分析能力还有待提高; 状态检修的重心集中在电力一次设备, 二次设备的状态检修没有得到相应的重视。

状态检修的内涵包括: 设备状态监测、设备故障诊断和检修决策。状态监测为状态检修提供基本数据支持; 设备故障诊断是以状态监测为依据, 综合设备历史信息, 利用神经网络、专家系统等技术来判断设备的健康状况^[5]。检修决策则是综合考虑设备的故障严重程度、检修成本、潜在风险等因素, 从而制定检修计划的过程。

过去对传统变电站实行状态监测和状态检修的主要困难在于状态数据的采集。传统变电站中, 不同厂商、不同设备使用的是不同的规范和协议, 使得相互之间信息不能共享, 形成了信息孤岛。而在智能变电站中, 站内设备形成了如图 1 所示的“三层两网”的以太网网络结构。通过 IEC 61850 标准及其抽象通信服务接口(Abstract Communication Service Interface, ACSI)映射的 GOOSE、MMS 报文和 SV 报文完成设备之间的信息交换和互操作。设备间的信息互通以及网络分析仪的使用, 给站内设备尤其是二次设备的状态监测带来了极大的便利, 推动了二次设备状态监测技术在现场应用的发展。

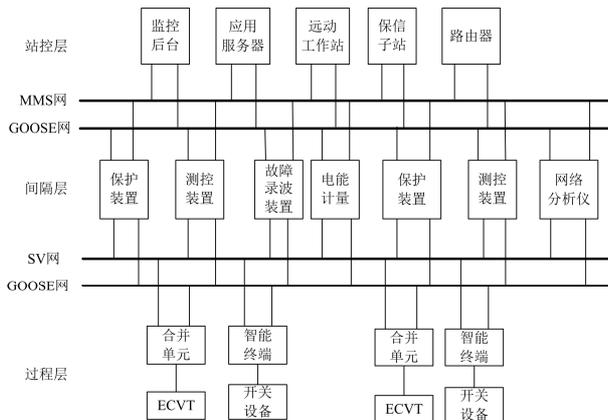


图 1 智能变电站网络基本结构

Fig. 1 Basic network structure of smart substation

本文对智能变电站二次设备状态监测的概念、设备信息建模和状态监测数据的分析处理方法进行了总结; 分析了数种告警信息处理和故障诊断方法的优点和不足, 并展望了未来二次设备状态监测的研究和应用前景。

1 二次设备状态监测的概念

在智能变电站的大力建设和 IEC 61850 标准深入推广应用的情况下, 国内外对变电站一次设备的状态监测已做了充分的研究^[6-7]。随着一体化调度自动化系统的部署, 需要实现一、二次系统的同步建模、采集与分析。虽然目前调度自动化系统对二次设备的在线监视与分析主要处理与解决的是继保设备、故障录波装置的相关信息, 但是二次设备的状态检修是未来智能变电站及站内智能设备检修的重要部分^[8]。而作为状态检修基础的二次设备状态监测工作就势在必行, 亟待开展。对二次设备状态监测不同于一次设备状态监测——通常需要单独安装监测设备来实现对主设备的监测; 由于微机保护已十分成熟, 二次设备通常具备较强的在线自检和通信功能, 因此无需另外安装监测设备, 使用设备自身集成的自检、通信功能即可完成状态监测的任务。在 IEC 61850 标准的统一规范下, 综合考虑二次回路负载及安全性, 对二次设备实行嵌入式状态监测是合理且妥当的。

文献[9]提出了几种智能变电站中对继保装置进行监测的对象和指标, 包括: 继电保护装置的电流、电压等 SV 通道状态; 直流逆变电源状态; 遥信、遥控等 GOOSE 通道的状态; 自检状态等。文献[5]提出将二次设备电源系统、设备开入开出回路、互感器二次回路、设备系统绝缘、设备通信信道状态、设备工况、二次设备软件版本和校验码等信息作为二次设备状态监测的对象。文献[10]认为, 由于智能变电站的发展, 变电站主控室内的设备不断增加, 大量运行于机柜内的设备在运行时产生较多的热量, 进而导致设备的运行温度较高。较高的温度是不利于二次设备的稳定运行的, 因此设备的温度也应该作为二次设备状态监测的一项内容。文献[10-11]在考虑监测保护、测控装置的基础上, 还提出将交换机等网络设备纳入二次设备状态监测的范围内, 这是因为通信网络中的各种设备也含有例如端口连接状态、端口双工模式、速率和吞吐量等表征通信网络运行状态的参数。对这些参数进行监测和分析, 可以更准确地掌握通信网络的运行状态, 从而更好地完成状态监测、故障诊断及故障定位等工作。总而言之, 二次设备状态监测的监测内容正向着全面化、全景化的方向发展^[12]。

智能变电站二次设备状态监测需要借助先进、准确的传感器技术将设备的状态数据采集、上送以完成原始运行数据的采集; 然后, 需对原始数据进行处理和分析, 判断设备当前的健康状况、预测可

能发生的故障，并制定相应的措施^[13]。智能变电站的二次设备状态监测是一个较宽的概念，涵盖的内容较宽泛，综合来看，可以总结如图 2。需要指出的是，针对网络交换机的状态监测目前还处于探索实验阶段，各厂家生产的智能变电站专用交换机的设计理念不尽相同，也尚无相关标准对此进行标准化。

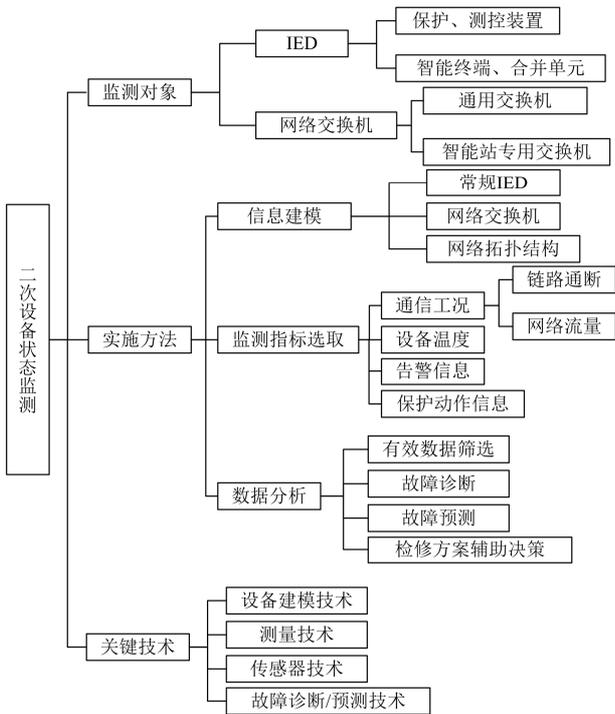


图 2 二次设备状态监测的概念

Fig. 2 Conception of secondary device condition monitoring

2 二次设备信息建模

在实施状态监测的过程中，首先需要对设备的信息进行建模。建模的目的是为了获得各种设备运行过程中的状态参数的规范表达。因此建模的要求是应对智能变电站内所有设备进行统一建模，并使用统一的、被广泛认可的标准来进行建模。在智能变电站中，二次设备已通过 IEC 61850 标准实现了通信和互操作，针对二次设备的信息建模也多围绕该标准，采用变电站配置语言(Substation Configuration Language, SCL)或统一建模语言(Unify Modeling Language, UML)进行。目前国家电网公司已着手开展智能变电站内二次设备的信息建模工作，并形成了一些二次设备状态监测的标准^[14]。虽然 2010 年国际电工委员会(International Electric Committee, IEC)发布了 IEC 61850 7-4 第二版，增加了状态监测逻辑节点，但都是针对一次设备而言^[15]。故当前在智能变电站中实际开展的二次设备状态监测基本依

靠网络分析仪对 GOOSE/SV/MMS 报文的连续性、合法性、时延以及通信链路、网络流量进行监测和告警。而设备的自检信息、二次回路信息等信息虽然能够采集到，但并没有通过报文上送，设计人员在变电站设计过程中也没有将这些数据列入虚端子表中。

2.1 二次设备信息建模的研究现状

研究人员在二次设备信息建模方面进行过一些研究。文献[16]将过程量、开关量、特征量根据 IEC 61850 标准进行建模，客户端通过主动召唤和报告相结合的方式获取 IED 数据。文献[17]结合二次设备状态监测的实际特点和功能需求，采用面向对象的建模技术，主要监测了站内二次设备和二次回路，以及设备的铭牌、标识和健康状态；提出了一种把变电站整个二次系统和二次回路作为统一监测对象整体来建模的思想。

文献[5]和文献[17]都提出将变电站一、二次设备进行统一建模，将状态监测信息形成一个设备状态全景信息平台提供给运维和继保人员。

此外，由于交换机在智能变电站中处于信息交换的枢纽位置，在二次设备状态监测中也应该将交换机纳入监测对象范围之内；在故障诊断中，尤其是在通信链路中断以及网络风暴^[18]等情况时也应考虑交换机和网络拓扑中存在的问题。然而 IEC 61850 标准目前并没有针对交换机的建模，一些研究者开始对 IEC 61850 标准进行扩展以完成对交换机的建模。文献[11]利用功能分解/信息提取、映射管理信息库的方法初步建立了智能变电站通信网络状态监测信息模型，提出了基于扩展 SCL 的通信网络配置描述方法，并给出了交换机的状态监测信息模型，包括交换机的 CID 文件和加入了网络拓扑的 SCD 文件。文献[19]也尝试了利用 SCL 对交换机进行建模，并给出了交换机通信服务映射的实现。在建模过程中发现由于建模标准的缺乏，数据对象的命名还存在较大的灵活性，这给交换机的可互操作性造成了障碍。也正是由于交换机建模标准的缺乏，这些研究还处于探索阶段，可以为业界提供一种新思想，但距离实际应用还有一定距离。

另外，一些继保设备生产厂商也开始研发专用于智能变电站的智能交换机。智能交换机的特点是在具备普通工业交换机的功能之上，还具备通过 GOOSE/MMS 报文上送交换机自身状态、网络流量以及交换机配置等功能。而智能交换机的研发乃至最终投入实际应用也需要相关标准的指导。

状态监测信息的建模是状态监测中重要的一环，而二次设备的状态监测信息建模也已经有 IEC

61850、UML 等标准进行规范。在进行一、二次设备统一建模和交换机建模时, 应充分利用这些已有的标准。标准制定组织也应及时推动标准的更新以完善整个智能变电站网络体系。

2.2 一种交换机及网络拓扑建模方案

以交换机及站内网络拓扑建模为例, 在目前智能变电站专用交换机尚未投入实际应用, 而二次设备状态监测又需要交换机及网络拓扑的情况下, 本文提出以下建模方案。

针对一般的通用交换机, 其建模目的可暂不要求向外报告自身状态, 如接口的光功率、网络流量等等, 而着重于对网络拓扑和设备物理连接关系的描述。根据相关标准^[20-21], 可以利用 IEC 61850-6 中规定的<PhysConn>节点来描述设备之间的物理连接关系。即在 SCD 文件的 Commnucation/SubNetwork 节点下, 添加交换机的 ConnectedAP 子节点, 示例代码如下:

```
<ConnectedAP iedName="QS001" apName="S1">
  <Address>
    <!--Address节点的内容-->
  </Address>
  <PhysConn type="Connection">
    <P type="Port">1-1</P>
    <P type="Plug">LC</P>
    <P type="Type">FOC</P>
    <P type="Cable">PL2201</P>
  </PhysConn>
  <PhysConn type="RedConn">
    <!--交换机其他端口-->
  </PhysConn>
  <!--交换机其他端口-->
</ConnectedAP>
```

根据文献[21], 当一台设备具有多个网络接口时, 将第一个<PhysConn>节点的 type 属性设置为 Connection, 其余节点此属性设置为 RedConn。此外, 文献[21]还规定了<PhysConn>节点下 type 属性分别为 Port、Plug、Type 的<P>节点的用途分别为端口编号、端口类型、线缆类型。但其未对 type 属性为 Cable 的<P>节点的用途做出规定, 这也使得<PhysConn>节点难以描述设备之间的连接关系。因此, 可以利用该节点来描述对侧所连接的设备, 如上文中的 PL2201 即表示该端口连接了 PL2201 这台设备。需要指出的是, 目前对于<PhysConn>节点的引入还在实验阶段, 因此对于将交换机所属的<ConnectedAP>节点加入到哪一个通信子网(即哪一个 SubNetwork 节点下)并无定论, 还有待于相关

标准的完善。

由于将交换机也作为 IED 加入到了 SCD 中, 而通用交换机实际上并不与外部发生 MMS、GOOSE 及 SV 通信, 故在 SCD 文件的<IED>节点中对交换机建模时, 可以不配置<AccessPoint>节点内部的内容, 只保留该节点的 name、desc、router 等属性, 而<Services>节点的配置也可以进行简化。

而针对智能交换机, 只需将对应的<IED>节点按常规 IED 设备进行建模即可。

为了描述站内的网络拓扑, 还需要在其他 IED 设备中也引入<PhysConn>节点。而这些设备的<PhysConn>节点配置的位置, 宜根据该端口或链路中传输的报文类型来选择。

3 二次设备状态监测数据的分析处理

目前针对智能变电站二次设备状态监测数据的处理的研究对象主要为变电站网络中的告警、变位报文, 从状态监测系统的设计、警报处理和故障诊断等角度开展。

文献[10]提出了一种在线式自我状态监测系统的架构, 该系统利用设备自检和设备之间的互相监测来实现二次设备的嵌入式监测。该系统的架构是一种总线型架构, 即间隔层各种二次设备将采集到的状态监测数据通过运行服务总线(Operation Service Bus, OSB)发送到监控后台, 由监控后台进行状态评估、故障诊断、健康状态可视化等功能。

文献[9]提出了将二次设备状态监测分为分布式和集中式两种形式, 并就集中式的监测提出了比较双套保护装置的相同间隔的采样值、开关量、状态量以判断装置是否存在故障的方法。文献[10]中所设计的自我状态监测系统在针对常规二次设备运行状态数据进行状态分类、故障诊断时主要采取比较法和趋势分析法, 对 SV、GOOSE 等智能变电站特有的报文监测时, 主要针对其报文连续性和报文正确性, 按照报文序列应有的规则进行监测和告警。

文献[22]提出了一种告警分类方案, 将各类告警报文按警报 ID 的特征分为: 动作保护、断路器动作、刀闸操作、重合闸、保护自检、网络通信共 6 大类。文献[23]指出智能变电站频繁、大量的告警容易影响运维人员对重要信息和事故的及时处理。提出了变电站智能告警的 5 个主要功能: 分级分类告警、过滤检修信息、重要告警自动推图、多源数据不一致告警处理、频繁告警处理。文献[24]采用动态故障树的方法建立了保护装置动作的逻辑模型和模式模型并搭建了基于保护动作模式的分布式警报处理模型。在该警报处理模型基础上, 通过扩展

SCL 生成了保护动作模式警报处理知识库, 以此实现了故障模型与软件代码的解耦。文献[25]也采用了诊断模型与代码相分离从而降低系统耦合度的模型驱动设计方案。

文献[22]采用候选原因假说生成与原因假说真实性评估同时在线并列运行的模式完成在线警报处理, 进而找到事件根源, 分析出漏报与误报的异常警报。其所设计并开发的在线警报处理系统已通过了大量实际警报案例测试, 实际应用于数字化变电站中。

文献[26]总结了智能变电站内各种设备的故障特征和故障原因, 并形成了产生式规则用于生成知识库和故障诊断的推理。采用专家系统实现了智能变电站二次系统的故障诊断。专家系统作为最早提

出、研究时间最长的电力系统故障诊断方法, 虽然存在需要频繁维护知识库的问题, 但由于其简单实用, 改进的专家系统仍被广泛应用。

文献[27]建立了基于 IEC 61850 的电网故障诊断完全解析化模型。通过解析 SCD 文件来获取保护配置信息和保护与断路器的关联关系, 然后基于保护配置信息和关联关系构建电网故障诊断的完全解析模型。解析模型的方法具有严密的数学理论基础, 具有较好的应用前景。

综上所述, 对于智能变电站二次设备的状态监测数据的分析以及处理主要体现在告警处理和故障诊断两个方面, 状态监测数据的分析与处理方法总结如表 1 所示。

表 1 状态监测数据的分析与处理方法

Table 1 Methods of analysis and process for condition monitoring data

数据处理及分析方法	数据来源	优点	不足	适用场合	文献
报文合法性、连续性校验	全站网络报文	处理速度快	基本网络分析, 难以确认故障原因	报文丢帧、异常判定	[10]
对比法	互为冗余的装置间的网络报文	能快速定位故障间隔	确认具体的故障装置还需其他手段进一步分析	不良数据识别	[9]
候选原因假说生成+原因假说真实性评估	各类告警报文、SCD 文件	能分析出漏报与误报的异常警报, 容错性较好	同时运行两种算法, 需要更多的硬件资源	故障诊断及综合分析	[22]
基于模型驱动的智能推理	各类告警报文、SCD 文件	实现了推理逻辑与程序代码的解耦, 降低了程序代码的复杂度	诊断结果以及故障推理报告的数据颗粒度较大, 细节较少	复杂链路及设备故障诊断	[24-25]
专家系统	全站网络报文、SCD 文件	研究时间长, 相关理论十分成熟	需根据网络结构频繁地维护知识库	复杂链路及设备故障诊断	[26]
解析模型方法	全站各类告警报文、SCD 文件	严密的数学理论基础, 较好的应用前景	当存在误报、漏报时容易得到错误的诊断结果	故障诊断及综合分析	[27]

4 结论

状态检修是一种可靠且经济的检修方式, 而状态检修的正确、有效实施需要先进的状态监测技术和准确的状态监测数据作为支撑。本文论述了智能变电站二次设备状态监测的概念和监测对象; 总结了智能变电站二次设备信息建模的研究现状和状态监测数据分析处理的方法; 提出了一种根据现有标准和规范, 利用<PhysConn>节点在 SCD 文件中描述二次设备网络拓扑结构的方法; 分析了智能变电站中各种状态监测方法所采用的数据源、优点和不足以及各自的适用场合。

目前, 针对二次设备的工作状态和网络通信状态的建模的研究正处于发展阶段, 尤其是 IEC 61850 标准并没有对在智能变电站网络中扮演重要角色的

交换机等网络设备进行建模, 使得目前的二次设备状态监测还难以做到完善, 相应的故障诊断工作也难以将交换机和网络拓扑纳入考虑范畴之内。值得注意的是, 目前已有部分继电保护厂商开始研发和生产智能变电站专用交换机, 能够采集交换机的状态信息, 如交换机端口流量、端口接收光强、发送光强、工作温度等数据, 并对交换机的状态进行综合评价^[28]。这将对二次设备状态监测产生积极意义, 但专用交换机的相关标准也还需要跟进和完善。同时, 也应继续探索如何对目前站内普遍使用的通用交换机进行建模以及网络拓扑的描述。

对于状态数据的分析和处理, 目前在二次设备状态监测的实际现场应用中多采用配置冗余设备对同一指标进行比较的方法来判断设备是否故障; 或

是通过网络分析仪检查报文的连续性、合法性进而判断变电站网络是否正常。上述方法通常只能发现站内存在的问题和异常, 难以分析故障的原因, 也对现场运维人员的消缺工作造成障碍。而对告警报文的分级、智能处理以及后续的故障诊断和故障预警目前还多处于研究和实验阶段, 在变电站中鲜有实际应用。因此, 如何运用各种故障诊断和故障预警的理论方法进行产品和软件系统的开发, 并在智能变电站中进行实际应用也具有重大的研究价值。

另一方面, 随着大数据以及云计算的兴起, 未来可考虑在变电站或调度中心建设云平台以提高状态监测以及其他系统的分析处理能力。此外, 智能变电站网络报文数据量大, 目前的处理手段通常只取故障时刻前后的报文来进行分析, 丢弃了大量可能存在利用价值的报文。而数据流挖掘正是一种从海量只能读取有限次数或对处理时间有限制的数据库中获取有用信息的方法, 十分适合于变电站网络报文的分析处理。未来, 随着云平台的建设和数据流挖掘的引入, 将可构建一、二次联合状态监测系统以及后续在其基础之上的故障诊断系统、故障预警系统、状态检修决策支持系统等高级应用。

参考文献

- [1] 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, 24(8): 48-52.
- [2] 朱钰, 陈瑞国, 郝建成. 浅谈电力设备状态检修[J]. 东北电力技术, 2010(3): 48-50.
ZHU Yu, CHEN Ruiguo, HAO Jiancheng. Discussion on condition-based maintenance of electric equipment[J]. Northeast Electric Power Technology, 2010(3): 48-50.
- [3] 黄雅罗, 黄树红. 发电设备状态检修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 4-23.
- [4] 廖天明. 我国状态监测技术和状态检修工作综述[J]. 供用电, 2012, 29(4): 13-16, 25.
LIAO Tianming. Review of condition monitoring technology and condition maintenance work in China[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(4): 13-16, 25.
- [5] 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.
- [6] LI J, HE Z, BAO L, et al. Condition monitoring of high voltage equipment in smart grid[C] // High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2012 International Conference on: IEEE, 2012: 608-612.
- [7] YAN H, GAO G, HUANG J, et al. Study on the condition monitoring of equipment power system based on improved control chart[C] // Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2012 International Conference on: IEEE, 2012: 735-739.
- [8] 秦建光, 刘恒, 陶文伟, 等. 电力系统二次设备状态检修策略[J]. 广东电力, 2011, 24(1): 24-27.
QIN Jianguang, LIU Heng, TAO Wenwei, et al. Status-oriented maintenance strategy for secondary equipment in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(1): 24-27.
- [9] 张晓华, 刘跃新, 刘永欣, 等. 智能变电站二次设备的状态监测技术研究[J]. 电气技术, 2011(4): 41-44.
ZHANG Xiaohua, LIU Yuexin, LIU Yongxin, et al. The technical research of secondary equipments' condition-monitoring in smart substation[J]. Electrical Engineering, 2011(4): 41-44.
- [10] 王红星, 黄曙, 马凯, 等. 智能变电站间隔层设备在线式自我状态监测系统设计[J]. 广东电力, 2013, 26(10): 69-74, 91.
WANG Hongxing, HUANG Shu, MA Kai, et al. Design of online ego state monitoring system for bay level device in intelligent substation[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(10): 69-74, 91.
- [11] 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 substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 87-92.
- [12] 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.
- [13] ZANG L H, BRETTERKLIEBER T, BRASSEUR G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58: 1789-1796.

- [14] 国家电网公司. Q/GDW 11010-2013 继电保护信息规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [15] IEC TC57. IEC 61850-7-4 communication networks and systems for power utility automation: part 7-4 basic communication structure-compatible logical node classes and data object classes[S]. IEC, 2003.
- [16] 黄海, 彭志强, 赵连辉, 等. 基于 IEC 61850 的状态监测通信方案应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(6): 9-12.
HUANG Hai, PENG Zhiqiang, ZHAO Lianhui, et al. Communication scheme application of status monitoring based on IEC 61850[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(6): 9-12.
- [17] 葛维春, 王芝茗, 顾洪群, 等. 一、二次设备状态监测信息融合及在 PMS 建设中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 150-154.
GE Weichun, WANG Zhiming, GU Hongqun, et al. The information fusion of condition-based maintenance system for primary and secondary power equipments and its application research in PMS system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 150-154.
- [18] 黄曙, 马文霜, 陈炯聪, 等. 智能变电站网络风暴的监测和过滤算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 68-72.
HUANG Shu, MA Wenshuang, CHEN Jiongcong, et al. Research on the network storm monitoring and filtering algorithm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 68-72.
- [19] 张小建, 吴军民. 智能变电站网络交换机信息模型及映射实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 134-139.
ZHANG Xiaojian, WU Junmin. Information model and mapping implementation of Ethernet switches in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 134-139.
- [20] IEC TC57. IEC 61850-6 communication networks and systems for power utility automation-part 6: configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. IEC, 2004.
- [21] 国家电网公司. Q/GDW 1396-2012 IEC 61850 工程继电保护应用模型[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [22] 韦刘红. 数字化变电站警报处理与故障诊断的方法与系统开发[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
WEI Liuhong. Alarm processing and fault diagnosis in digital substations: methods and software development[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [23] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [24] 邓飞. 基于 IEC61850 的电力系统警报处理信息模型建立与算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
DENG Fei. Information model building and algorithm research for power system alarm processing based on IEC61850[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [25] 许祖锋. 基于模型驱动的变电站智能告警应用软件开发与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
XU Zufeng. Research and design of intelligent warning software of substation based on model driven[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [26] 聂德楨. 智能变电站二次系统故障诊断方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
NIE Dezhen. Study on fault diagnosis method for smart substation secondary system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [27] 刘道兵, 顾雪平, 李海鹏. 基于 IEC 61850 的电网故障诊断完全解析化建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 94-100.
LIU Daobing, GU Xueping, LI Haipeng. Complete analytic modeling for power system fault diagnosis based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 94-100.
- [28] 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.

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-05-25

作者简介:

蔡骥然(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信、智能电网通信技术; E-mail: caijiran@hotmail.com

郑永康(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护, 优化算法, 智能变电站二次技术;

周振宇(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为通信网络资源优化与管理, 智能电网通信技术。

(编辑 魏小丽)