

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200376

服务于变电站数字化设计的二次设备建模技术研究

刘千宽¹, 刘宏君², 丁晓兵¹, 李进²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对变电站二次回路设计采用 CAD 图纸表达方式无法机器获得设计内容的问题, 提出一套完整的变电站二次回路数字化设计流程; 并研究服务于数字化设计的变电站二次设备及回路的建模方案。从二次回路数字化设计需求着手, 分析不同部门对二次回路建模的需求, 二次设备建模关注设备的物理属性和连接属性。在建模方案中, 定义智能建模的范围、建模对象以及建模语言, 并通过建模工具实现变电站二次设备建模及二次回路数字化设计。试点工程的设计效果验证了方案的可行性。

关键词: 变电站; 二次回路; 图模一体化; 建模技术; XML 语言

Research on secondary equipment modeling technology for substation digital design

LIU Qiankuan¹, LIU Hongjun², DING Xiaobing¹, LI Jin²

(1. Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. CYG SUNRI Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: The design content of the secondary circuit of a substation cannot be obtained by computer using the CAD drawing expression method. Thus a complete digital design process of the secondary circuit is proposed, and the modeling scheme of secondary equipment and circuit for substation digital design is studied. Starting from the requirements of secondary circuit digital design, this paper analyzes the requirements of different departments for secondary circuit modeling, and focuses on the physical properties and connection properties of equipment. In the modeling scheme, the scope, object and language of intelligent modeling are defined, and the modeling of secondary equipment and digital design of secondary circuit are realized by modeling tools. The design effect of the pilot project verifies the feasibility of the scheme.

This work is supported by the 2018 Annual Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZDKJXM20180001).

Key words: substation; secondary circuit; graph module integration; modeling technology; XML language

0 引言

中国南方电网公司在“十二五”期间全面开展“6+1”工程, 将资产管理贯穿于基础建设、生产管理、设备运维的全过程。对创新跨区电网建设工作机制、深化基建标准化建设、提升工程管理能力 and 建设水平提出了新要求。

目前, 电力一次设备的智能化^[1-2]、通信的网络化以及二次设备数字化^[3-4]都取得了一定的进步。但电网公司对涉及电网安全的二次回路信息的管理方式仍比较陈旧, 主体形式为传统的图档管理模式:

电力设计单位对电气施工蓝图和竣工蓝图的管理, 运维单位对设计单位移交资料的管理。此种管理模式, 难以满足从基础建设、生产管理、设备运维的全过程资产管理需求: (1) 设计图纸与文档输出格式不统一, 难以满足电网工程设计成果的统一存储与管理的需要。这种状况不利于电网公司对重要数据的统一调用和安全管理, 与集约化发展、精益化管理和信息化建设的要求存在一定差距; (2) 施工单位应承担起在基础建设过程中对施工蓝图进行一定范围修改与校对并向设计单位反馈的职责, 但实际变电站施工阶段, 施工单位因自身技术水平不足、技术手段缺乏等原因, 对施工图纸的问题反馈极其有限, 导致最终设计单位移交的竣工蓝图与现场实际二次回路情况不符, 使后续运维检修工作开展及

基金项目: 中国南方电网 2018 年度科技项目资助 (ZDKJXM 20180001)

电网事故处理难度提高; (3) 在生产管理及设备维护过程中, 针对二次回路开展的检修工作不具备继承性, 运维人员到达现场前无法通过技术手段获取自动化设备及二次回路状态等相关历史信息并进行有效的预处理, 抵达现场后难以快速准确定位隐形复杂故障, 需根据问题情况不断试错验证, 且操作步骤繁琐, 甚至危及电网安全运行。

随着我国智能电网发展, 智能变电站建设速度加快。在智能站建设中, 二次设备朝智能化方向迈进一步, 主要体现在二次设备 IED 化, 增加设备信息的建模; 信息交互网络化, 采用光纤网路传递设备信息, 取消了传统屏柜之间的信号电缆^[4]。在智能变电站的二次设计方面, 也取得了很多的成就, 包括设计配置一体化工具, 施工图的设计表达^[5-9]等。但这些工作主要体现在解决变电站自动化的问题, 聚焦在二次设备的通信模型和通信网络, 对二次设备本身的物理特性, 以及设备之间的连接属性关注不够, 常规变电站的设计更是如此。二次设计图纸大多采用 CAD 设计, 回路之间的连接关系只适合人工阅读, 不适合机器识别。某些自动化系统的高级应用需依赖设计图纸, 因难以从设计图中机器自动获取对应关系, 需要人工再次配置, 降低工作效率并增加了出错的概率。CAD 图纸解决了变电站工程的信息化问题, 遗漏掉许多工程信息, 包括设备的硬件结构、板件、版本以及生产日期等, 这都迫切需要数字化设计解决。

本文构建一套完整的变电站二次的数字化设计流程, 研究变电站二次设备的建模技术, 实现变电站二次设备信息的模型化、设备连接信息的数字化, 满足二次设备信息全生命周期的数字化管理。

1 二次回路数字化设计

1.1 数字化设计需求

无论常规站还是智能站, 二次设计都是由设备制造厂商和设计院共同完成的, 如图 1 所示。

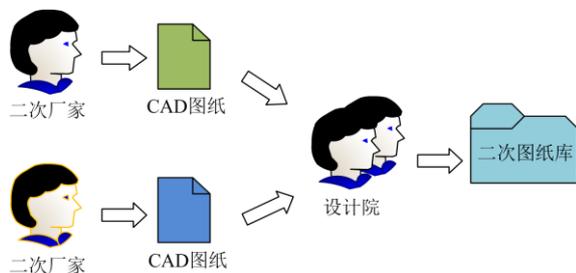


图 1 二次设计流程图

Fig. 1 Secondary design process of substation

在智能变电站设计中, 设备制造厂商提供工程应用的设备屏柜图纸, 同时还提供 IED 设备的 ICD 文件。设计院完成二次回路原理图并完成屏柜间的关联关系。与原理相关的连接关系和通信网络设计都体现在 SCD 文件中, 只有少部分连接关系体现在图纸上, 包括直流电源、一次设备到智能终端的连接等。智能站的 SCD 文件是数字化文件, 在后续运维过程中有很多应用, 包括回路原理图展示^[10-16]、过程层应用^[17-18]、配置文件的管控^[19-20]等。SCD 文件的数字信息能给其他应用使用, 无需重复配置, 提高作业效率。

在常规变电站的设计中, 设备的外特性、装置间的关联关系均体现在图纸中, 通过继电保护回路图、测控回路图及自动化装置信号回路图等表达二次设备原理、功能以及一二次设备的连接关系; 通过端子排图和电缆清册等反映电缆的连接关系^[7]。常规站的设计成果都是信息化图纸。

无论常规变电站还是智能变电站的二次设计, 其主体内容是统计设备物理信息并完成设备之间二次回路的“走向”信息设计。设备的物理信息包括设备的生产厂家、型号、版本以及内外特性等; 二次回路信息包括交直流电源回路、电流电压回路、信号回路、控制回路等。总结这两方面, 二次回路数字化设计重点关注以下三点。

1) 设备的物理属性: 包括二次设备屏柜的数量与属性; 单一屏柜内部二次设备属性, 包括二次设备装置的板件信息、端子信息和对外通信接口等; 屏柜的附件信息包括空开、压板、把手、光纤配线盒和打印机等。

2) 设备的连接属性: 将一次设备的端子箱、操作箱、智能柜、保护柜之间以及屏柜内部的各个模块、设备、端口等连接起来, 形成一个完整的“回路”, 并标识清楚回路的定义。

3) 设计成果的工程管理: 二次设计的数字化成果完成后, 由设计院提供给用户单位。用户单位在建设、施工和运维过程中, 需要能清晰地了解工程设计图纸; 同时, 在发现有缺陷时, 能方便可控地修正图纸, 在工程的全生命周期内保持图纸与工程的一致性。

1.2 图模一体化技术

变电站二次回路数字化设计采用图模一体化技术^[21]。图模一体化技术是指把图形与数据作为一个整体进行存储和管理, 图形关联数据, 数据反映图形。常用的做法是定义图形的属性, 将数据存于数据库中。存储的图形和数据信息可导出成文件, 供其他应用使用。图模一体化技术很好地将数据、模

型和图形结合起来。

组成变电站的二次回路是由一系列元器件和导线构成控制回路。二次回路数字化设计的核心思想是利用附带建模属性信息的图元来设计控制回路中的元件、端子和导线，并实例化，使得图形和数据库模型一一对应，实现数据的可视化。

图模一体化的图形采用可缩放的矢量图形(Scalable Vector Graphics, SVG)。SVG 图形是基于可扩展标记语言(Extensible Markup Language), 用于描述二维矢量图形的一种图形格式。它是万维网联盟

制定的一个开放标准，并在电力系统中有多种应用^[22-23]。SVG 图像由两大部分构成：图形定义和图形渲染。图形定义主要包括显示属性和图元定义；图形渲染即图形绘制，其内容包括自定义图元的引用和基本图形元素的使用。SVG 图像的优势为开放的文件格式，可以用任何文字处理工具打开，并可通过改变部分代码来使图像具有交互功能。

1.3 数字化设计的流程

数字化设计流程如图 2 所示。

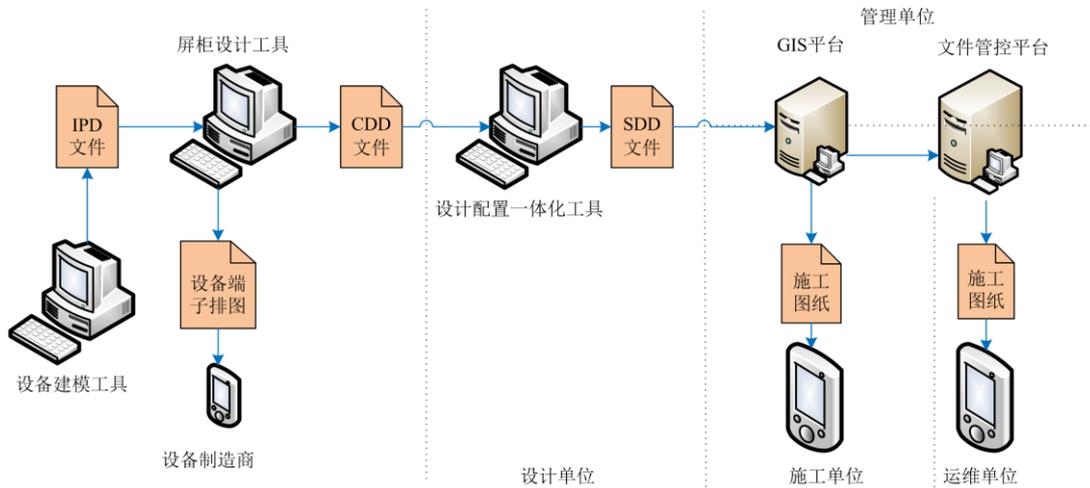


图 2 二次回路设计实施流程图

Fig. 2 Implementation process of secondary circuit design

1) 智能电子设备物理能力描述文件 (IED Physical Capability Description, IPD)输出。IPD 文件描述了 IED 设备的装置本体、板卡、端口的物理能力。设备制造厂商完成一二次设备的建模并形成装置的 IPD 文件。设备厂商将 IPD 文件提供给屏柜设计单位完成屏柜设计。

2) 屏柜设计配置，完成屏柜设计结果描述文件 (Cubicle Design Description, CDD)。CDD 文件描述屏柜内部的设备组成、端子属性和连接关系等。屏柜配置工具采用图模一体化技术将屏柜、IED 设备、插件、端口、空开、把手、端子排、打印机、光配等进行数字化；并基于图元，将屏柜的竖端子、空开、把手、压板、二次设备端口等，连接成为一个完整的回路，形成 CDD 文件。

3) 设计院完成屏柜间的设计，完成变电站设计结果描述文件(Substation Design Description, SDD)。SDD 文件为从设计院输出的全站电气二次系统设计结果描述文件，包括通信系统、监控系统、屏柜间连接关系等。相比传统的 CAD 设计，SDD 文件包含有图形信息，尤其包含有大量与后续运维相关

的数字化信息。

4) 工程交付在电网公司基建部门的 GIS 平台上完成。

5) 运维单位从 GIS 平台获取二次的全站设计文件。后续的变更、更新均在运维管控平台上完成，保证工程图纸与实际的一致性。

总体而言，数字化设计流程就是从基础的 IED 设备着手进行数字化处理，在 IED 设备的基础之上实现屏柜的数字化，全站二次回路信息的数字化。因而，二次设备的建模是二次回路数字化设计的基础。

2 二次设备建模

在实现变电站二次回路数字化设计的环节中，二次设备的建模最为重要。设备建模是设备制造商、设计院设计的基石，同时也是后续运维过程中数字化工程文件的核心。

2.1 范围定义

二次回路信息包括两个部分，屏柜信息和屏柜的连接关系。屏柜信息主要由设备厂商提供，包括

屏体信息以及构成完整屏柜的内部物料及连接信息, 包括屏柜、二次设备、空开、把手、压板、端子、连接线缆等。屏柜间的连接关系主要由设计院完成, 包括屏柜所在小室、所处间隔、屏柜布置、变电站与屏柜之间连接线缆等信息。

二次设备是屏柜中的重要组成部分。从设计专业角度看, 二次设备信息建模包括两个部分: 设备对象图形化建模和设备对象应用属性建模。

设备对象图形化建模, 是指设备对象的图形化表达, 如二次设备正视图、背视图、压板以及各种原理图等, 它是通过图形化的方式形象直观地表达设计对象以及设计对象的外特性。数字化设计采用图模一体化技术, 图形采用 SVG 图形。

设备对象应用属性建模, 是指二次设备本体、组成二次设备的板件、设备的电压电流变换器、继电器、端子等部件的应用属性定义。应用属性定义的内容应满足设备的物理属性和应用需求。设备的物资属性包括设备的名称、类型、制造厂商和版本信息等; 设备的应用需求包括: 装置电源电压、功耗、运行环境、端子类型、继电器类型等。

以继电保护设备为例, 表 1 为装置的应用属性定义。建模的属性包括设备名称、装置类型、制造厂商、装置尺寸、装置板件以及功率等。只要是制造厂商和用户关心的应用属性都可以定义。

表 1 二次设备对象(IED)属性定义

Table 1 IED attribute definition

属性名称	属性说明	属性类型	M/O
name	设备名称	VisString64	M
desc	设备描述	Unicode255	M
type	装置类型	VisString64	M
manufacturer	制造厂商	Unicode255	M
configVersion	配置版本	VisString64	M
frontSize	前面板大小	Unicode255	O
backSize	背视图装置大小	Unicode255	O
totalBackboard	背板板件总数	INT8	O
class	装置类别	Enum	O
actPower	动作功率	FLOAT	O
norPower	正常功率	FLOAT	O

表 2 定义的是构成 IED 设备的板卡建模。包括板卡的名称、描述以及插槽号等。板件信息在设备运维中很重要, 继电保护的统计分析和状态评价均使用到二次设备的板件信息^[24-25]。同一制造商不同类型的装置可能使用到同一硬件版本的板件, 单一板件问题影响到多个装置, 这一类型的家族性缺陷

分析、定位以及梳理均需统计到板件。

表 2 设备板卡对象(BOARD)属性定义

Table 2 Device board object attribute definition

属性名称	属性说明	属性类型	说明
name	板卡名称	VisString64	M
desc	板卡描述	Unicode255	M
type	板卡类型	Enum	电源板/通信板/ IO 板等
width	板卡宽度	FLOAT	—
backboard	是否背板	BOOLEAN	TRUE/FALSE
slot	插槽号	INT8	M

IED 设备的端子有多种类型, 包括电源端子、电流端子、电压端子、开入端子、开出端子以及通信端子等。不同的端子需要定义不同的属性。例如: 电源端子需要知道是 110 V 还是 220 V 直流电源; 电流端子是 1 A 制还是 5 A 制, 这些属性定义为设计的自动关联和自动校核提供基础。表 3 为开出端子的属性定义。

表 3 开出端子对象(KO)属性定义

Table 3 Output terminal object property definition

属性名称	属性说明	属性基本类型	M/O
name	端子编号	VisString64	M
desc	端子描述	Unicode255	M
nodeType	接点类型	Enum	M
holdType	自保持类型	Enum	M
capacity	接点容量	INT32	M
outType	开出属性	Enum	M
match	配对端子	ObjectReference	C1

2.2 建模对象

在智能变电站设计中, 对于变电站的主接线以及间隔接线的建模都有一些成果^[26-28], 这部分成果也可应用于常规变电站设计中。

二次回路建模对象包括变电站、小室、间隔、屏柜、设备、板件、端子排、端口、线缆等表征二次回路信息的总和。

按设计主体的不同, 建模对象又分为三类: 设计院建模对象、厂家设计单位建模、设备供应商建模对象。

设计院建模对象包括变电站、间隔、小室; 厂家设计单位建模对象包括屏柜、空开把手等屏柜内部物料、屏柜端子排; 二次设备供应商建模对象包括二次设备。

2.3 建模语言

二次回路智能建模采用自定义的变电站设计描述语言(Substation Design Description Language, SDL)。SDL 语言基于可扩展标记语言(XML)。按照

W3C 定义 XML 模式描述了 SDL 语言的语法规则。在 SDL 图形化定义部分，继承了 SVG 的语法规则和定义，如图 3 所示。

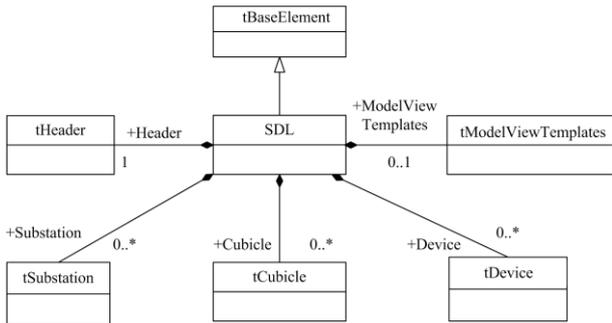


图 3 SDL 模型的 UML 概况

Fig. 3 UML overview of SDL model

为了便于不同设计单位、配置工具之间交换设计配置描述文件的信息，采用的 SDL 建模语言具有以下内容。

信息头部分：描述了文件的版本、修订变更过程和具体的变更原因等。其内容可以追溯文件的变更情况，方便文件的版本管理。

变电站的设计信息部分：包括变电站内的小室信息、小室内的屏柜布置以及屏柜之间的线缆连接关系等。设计信息是描述电力设计院设计内容的主要载体。

屏柜信息部分：包括屏柜内部的物料信息、原理图、屏柜内部的连接信息等。屏柜是厂家设计单位的主要输出内容。

IED 设备信息部分：主要包含设备的板卡、端子以及端口配置、装置原理图信息等。其建模内容由二次设备供应商完成。

通用模板部分：为了使建模文件简化且层次分明，将一些描述主体的公用部分提取出来，构成通用模板。公用信息包括图形信息和模板信息。通常模板部分是设计的主体单位从管理和技术层面给出的设计要求，便于整个设计质量的控制和最终呈现。

2.4 建模工具

使用建模工具完成对象的建模以及设计业务内容，按业务主体和内容的不同，分为三个建模设计工具。

设备建模工具：设备供应商应用设备建模工具完成二次设备的建模，包括设备图形(前视图、背视图、原理图)和应用属性建模(装置、板卡、端子块、端口)，生成 IPD 文件。

屏柜设计工具：集成厂家应用屏柜设计工具完成屏柜的设计工作，包括屏柜图形(前视图、背视图、

原理图)和物料属性建模，输出 CDD 文件。

电气二次设计配置工具：设计院应用变电二次设计配置一体化工具完成全站电气二次设计配置业务，包括原理图、端子排图、柜面布置图和全站系统结构图(小室、间隔、屏柜)等，输出 SDD 文件。

3 工程实践

广东东莞 220 kV 伯治站是智能变电站，选取该站 110 kV 电压等级的二次回路设计作为数字化设计的试点。

厂家提供屏柜的数字化图纸。图 4 为截取的 110 kV 线路保护柜线路保护装置的信号回路图。

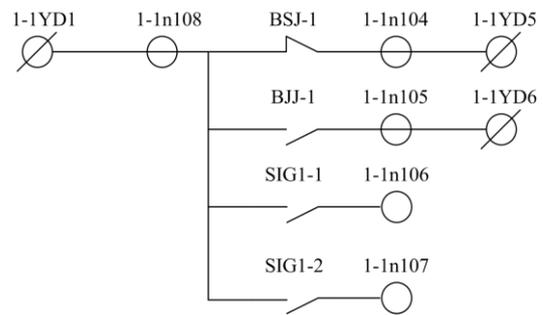


图 4 信号回路图

Fig. 4 Signal circuit diagram

图 4 中，BSJ/BJJ/SIG1/SIG2 为信号继电器的触点，其为带有建模信息的元件，可以查看其物理特性和应用属性。104—108 为线路保护的开出端子号，可查看表 3 的端子属性。1YD 为建模后的屏柜竖端子。

在完成屏柜的电气原理图设计后，自动生成屏柜的竖端子图，如图 5 所示。

1-1YD					
装置1	引脚1	编号	装置2	引脚2	T
1-1n	108	1			⊙
		2			⊙
		3			
		4			⊙
1-1n	104	5			⊙
1-1n	105	6			

图 5 屏柜的竖端子

Fig. 5 Vertical terminal of cubicle

采用数字化设计，只需要完成原理图设计，即完成了端子排设计，从而避免了传统设计中因模板更改不彻底造成的设计错误。

4 结论

变电站二次设备及回路建模是变电站二次回路数字化设计的基础。传统的基于 CAD 图纸的设计, 只解决了建设管理的信息化问题; 而数字化设计, 将传统人为识别的信息化图纸变成了计算机能识别并处理的二进制编码。本文对二次设备及回路建模的研究, 目前已完成 IPD/CDD/SDD 建模规范的初稿, 并根据初稿解决了继电保护屏柜图纸的数字化, 开始在广东东莞 220 kV 伯治站的设计中应用。在实际工程应用中, 针对可能存在的问题对已有的成果不断地优化, 并最终形成电网公司二次设计数字化的标准规范。

参考文献

- [1] 彭在兴, 王颂, 陈曦. 新电改背景下电力设备智能化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 1-6.
PENG Zaixing, WANG Song, CHEN Xi. Research on intelligent power equipment under the background of new power reform[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 1-6.
- [2] 武星, 王瑜, 殷晓刚, 等. 电力设备状态评价系统的开发与应用[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 7-12.
WU Xing, WANG Yu, YIN Xiaogang, et al. Development and application of power equipment status evaluation system [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 7-12.
- [3] 崔逸群, 王文庆, 刘超飞, 等. 火电厂设备层通信网络安全问题分析[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 152-156.
CUI Yiqun, WANG Wenqing, LIU Chaofei, et al. Analysis on safety problem of communication network in device layer of thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 152-156.
- [4] 高翔. 智能变电站技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 修黎明, 高湛军, 黄德斌, 等. 智能变电站二次系统设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 124-128.
XIU Liming, GAO Zhanjun, HUANG Debin, et al. Secondary system design method for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 124-128.
- [6] 马凯, 黄曙, 侯艾君, 等. 智能变电站二次系统典型设计智能辅助方案研究[J]. 广东电力, 2014, 27(3): 40-43.
MA Kai, HUANG Shu, HOU Aijun, et al. Study on typical designed intelligent assistant scheme for secondary system on in intelligent substation[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(3): 40-43.
- [7] 王增华, 窦青春, 王秀莲, 等. 智能变电站二次系统施工图设计表达方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 112-116.
WANG Zenghua, DOU Qingchun, WANG Xiulian, et al. A construction-drawing design expression method of secondary system for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 112-116.
- [8] 孙一民, 裘愉涛, 杨庆伟, 等. 智能变电站设计配置一体化技术及方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 70-74.
SUN Yimin, QIU Yutao, YANG Qingwei, et al. Configuration design integration technology and scheme for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 70-74.
- [9] 笃峻, 叶翔, 王长瑞, 等. 智能变电站设计配置一体化功能规范研究及工具开发[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 85-89.
DU Jun, YE Xiang, WANG Changrui, et al. Functional specification study on intergration of configuration and design in smart substation and corresponding tool development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 85-89.
- [10] 高旭, 刘宏君, 杜丽艳, 等. 基于综合评价识别法的智能变电站虚回路在线状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 182-187.
GAO Xu, LIU Hongjun, DU Liyan, et al. Study on the online status monitoring technology of intelligent substation virtual circuit based on comprehensive evaluation and recognition method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 182-187.
- [11] 高磊, 杨毅, 苏麟, 等. 智能变电站二次系统物理回路建模方法及设计实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 130-139.
GAO Lei, YANG Yi, SU Lin, et al. A modeling approach and design implementation of secondary system physical circuit for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 130-139.
- [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] 刘蔚, 杜丽艳, 杨庆伟. 智能变电站虚回路可视化方案研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 32-33.
LIU Wei, DU Liyan, YANG Qingwei. Research and application of smart substation virtual circuit visualization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 32-33.
- [14] 葛立青, 赵光元, 杨凡, 等. 智能变电站二次回路故障诊断方法研究[J]. 智能电网, 2014, 2(6): 28-31.

- GE Liqing, ZHAO Guangyuan, YANG Fan, et al. Research on the secondary circuit fault diagnosis methods[J]. Smart Grid, 2014, 2(6): 28-31.
- [15] 侯亮, 冯亮, 杨庆伟. 智能变电站虚拟回路自动化校核技术的研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 44-48. HOU Liang, FENG Liang, YANG Qingwei. Research of smart substation virtual circuit automatic checking[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 44-48.
- [16] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 继电保护在线状态检修的应用和探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 132-138. YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Application and discussion on online condition-based maintenance of relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 132-138.
- [17] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.
- [18] ZHANG Jie, LI Jun'e, CHEN Xiong, et al. A security scheme for intelligent substation communications considering real-time performance[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 948-961.
- [19] 孙一民, 刘宏君, 姜健宁, 等. 智能变电站 SCD 文件管控策略完备性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 105-109. SUN Yimin, LIU Hongjun, JIANG Jianning, et al. Analysis on completeness of substation configuration description file control strategy for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 105-109.
- [20] 高磊, 石慧, 杨毅, 等. 智能变电站配置描述文件管控系统的研究与实现[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 85-89. GAO Lei, SHI Hui, YANG Yi, et al. Research and implementation of configuration description file management system for smart substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 85-89.
- [21] 江翼, 张海龙, 吴俊杰. 电力系统图库模一体化的研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 85-88. JIANG Yi, ZHANG Hailong, WU Junjie. Gallery electric power system is the integration of the research[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4): 85-88.
- [22] 刘宏君, 李锋, 李会新, 等. 基于 SVG 图形的继电保护故障分析技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 140-144. LIU Hongjun, LI Feng, LI Huixin, et al. Study on fault analysis of relay protection based on SVG[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 140-144.
- [23] 纪陵, 蒋衍君, 施广德. 基于 SVG 的电力系统图形互操作研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 105-109. JI Ling, JIANG Yanjun, SHI Guangde. SVG-based graphics interoperability of electric power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 105-109.
- [24] 杨国生, 戴飞扬, 王文焕, 等. 基于灰度关联法和 TOPSIS 法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 94-103. YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.
- [25] 尹相国, 张文, 路致远, 等. 面向智能变电站二次设备的故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 39-45. YIN Xiangguo, ZHANG Wen, LU Zhiyuan, et al. Research on fault diagnosis method for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 39-45.
- [26] 艾精文, 党晓婧, 吕启深, 等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 122-128. AI Jingwen, DANG Xiaojing, LÜ Qishen, et al. Research on full dimension equipment status monitoring system with panoramic function[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [27] 侯艾君, 马凯, 刘俊红. 基于扩展 SSD 的变电站全景建模方法[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 64-67. HOU Aijun, MA Kai, LIU Junhong. Panorama modeling method for substation based on system specification description[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 64-67.
- [28] 陈锦山, 唐志军, 翟博龙, 等. 基于间隔的智能变电站 SSD 建模规范研究与应用[J]. 智能电网, 2017, 5(9): 876-882. CHEN Jinshan, TANG Zhijun, ZHAI Bolong, et al. Research and application of bay-based SSD modeling specification for smart substation[J]. Smart Grid, 2017, 5(9): 876-882.

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-06-28

作者简介:

刘千宽(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护技术管理; E-mail: liuqiankuan@sina.com

刘宏君(1974—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护及自动化设备; E-mail: liuhj@sznari.com

丁晓兵(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护和运行控制。E-mail: dingxb@csg.cn

(编辑 许威)