

智能变电站全寿命周期“即插即用”技术体系的研究与应用

刘颖

(南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 以“即插即用”技术体系的研究和在智能变电站应用为主线, 提出了包括智能变电站的设计、建设、运维三个阶段全寿命周期内的技术创新思路。介绍了在设计阶段虚端子自动关联技术和分布式就地化保护网络架构, 在建设阶段新材料新工艺的预制舱和标准化预制光缆的创新, 在运维阶段探讨全景仿真闭环测试系统、自动识别系统的免整定继电保护和智能跳闸等技术研究情况。结合工程实践, 陈述了即插即用相关技术的应用情况, 对智能变电站发展方向提出了展望。

关键词: 智能变电站; 设计; 建设; 运维; 全寿命周期; 即插即用

Research and application on the technology system of plug & play in the smart substation's life cycle

LIU Ying

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: Plug and play of the smart substation's life cycle is the main line, which includes three stages, i.e. the design, construction and operation. It introduces the method of virtual terminator auto-mapping and network architecture of distributed local protection in the design stage, refers the precast cabin of the new material and the innovation of standard precast optical cable in the construction stage, and studies the advanced application of panoramic simulation closed loop test, no-setting protection of auto-identification system of and smart tripping, etc. in the operation stage. Last it forecasts the future trend of the smart substation combined with its application.

Key words: smart substation; design; construction; operation and maintenance; life cycle; plug and play (P&G)

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)22-0023-06

0 引言

国内智能变电站从最初的站控层通信 IEC 61850 标准互操作开始, 到电子式互感器应用的数据采集数字化和过程层 SV(Sampled Value)、GOOSE(Generic Object Oriented Substation Events)网络化的应用, 再到以 220 kV 无锡西泾变为代表的全站设备智能化, 再到以空间维度和时间维度协调控制的层次化继电保护系统和建筑模块化设计思路的标准配送式变电站建设为主要特点的新一代智能变电站。由最初 IEC 61850 标准简单应用的初级阶段, 逐步向集成化、网络化、智能化的深层次研究与应用发展。智能变电站由数字化变电站演变而来, 经过数年的发展, 与智能电网其他环节相比较, 技术正日臻完善, 并已经进入规模化推广。2011 年以

后所有新建变电站已经全面按照智能变电站技术标准规范建设, 并且重点对枢纽及中心变电站进行智能化改造。

总结前期智能变电站建设的经验, 对现有的智能变电站研究技术提升, 坚持“安全可靠、技术先进、功能集成、标准统一、通用互换、运行高效”原则, 在变电站全寿命周期, 即设计理念、工程建设、运维方式的三个方面推广即插即用, 实现可靠性、统一性、通用性、经济性、先进性和灵活性的多方面协调。

1 智能变电站技术发展现状与瓶颈

1.1 智能变电站的技术发展现状

智能变电站表面上看就是通信的光缆替代了原来常规变电站的电缆, 光缆里面的数字报文替代

了电缆中模拟量的电信号，而过程层设备合并单元实现常规互感器的模数转换、智能终端实现常规开关的智能控制。但智能变电站和常规变电站的核心差异体现在站内通信的标准体系，常规变电站的通信建立在 IEC 61870-5-103 基础上，而智能变电站的通信基于 IEC 61850 标准，IEC 61850 参考和吸收了已有的许多相关标准，其中主要包括 IEC870-5-101、IEC870-5-103、UCA2.0 和 MMS^[1]。

为保证报文传输的实时性和可靠性，智能变电站的二次系统多采用“三层两网”结构，过程层网络和站控层网络相互隔离。这种组网方式下，能够进行有效的信息分类和隔离，但产生多个独立的信息传递网络，导致接线复杂，降低网络设备的可靠性，增加网络的运维工作量。新一代智能变电站建立一个覆盖全站的高性能、高可靠、简单易维护的站内“一体化”网络，实现站内所有 IED 之间的 GOOSE、SV、MMS 和 IEEE-1588 网络对时等通信业务的共网传输。

大电网的运行正越来越弱化继电保护、安稳系统和解列三道防线之间的界限，新一代智能变电站中层次化保护系统包括三个层面：就地快速保护、站域保护控制和广域控制保护，它们从不同角度对电网进行防护，在满足继电保护“四性”要求的基础上，优化后备保护的配合级差，提高保护、安稳和解列的综合性能。电网故障发生后，就地快速保护可迅速隔离故障，站域、广域保护监视断路器的动作情况，根据当前网络的拓扑结构，实时对各元件后备保护进行调整，加速后备保护动作，在第一时间隔离不安全因素，保证系统安全稳定运行。

智能变电站站控层设备采用一体化监控系统，通过系统集成优化和信息共享，实现电网和设备信息的统一接入、统一存储和统一管理，为调度、生产等主站系统提供统一的变电站操作和访问服务。

1.2 智能变电站发展遭遇的瓶颈

智能变电站区别于常规变电站，对于运维专业技术工程师们除了原有的专业电力系统知识技能外，需要掌握更多网络知识。IEC 61850 面向功能，把智能设备抽象为模型，在设计阶段二次智能设备关联时采用虚端子链接虚回路，晦涩难以理解，用可扩展标记语言(Extensible Markup Language, XML)编写的变电站配置描述文件 Substation Configuration Description, SCD)不如常规变电站主接线电气设计图直观易懂，这些都给设计、建设、运维工作方式都带来很大的变化。

新一代智能变电站试点工程采用标准配送式建设模式，全面整合站内房间布置形式，将站内所有

建筑物整合为若干个单元二次设备舱。其具有占地面积少、建筑外形简洁、移动运输便利、安装就位快捷、工程造价经济等优点。但安装就位后的设备舱连接方式仍较为复杂，设备调试方式沿用传统模式，造成在现场安装后工作量依然很大，需要一种可靠、快捷标准化的接线和自主化的调试手段，更有效地优化站内的施工方式、缩减站内调试工期。而且现在设备舱普遍采用钢结构，此种材料适应性不强，其材质与一次设备外壳属于同类，寿命和一次设备正常工作的使用年限相近，且因各地环境的差异，长期暴露在户外，不能完全适应于各种恶劣气候条件下严酷的工作环境。

虽然站内二次设备已经基本实现了智能化，但由于一次设备智能化水平不高，造成设备在线监测技术不够成熟，一、二次设备没有实现融合，使得设备的运行维护工作缺乏有力支撑。而且保护控制装置孤立地面向单一对象，未能有效充分利用站内的信息共享，实现综合分析决策和自动协同控制。

1.3 “即插即用”技术理念

“即插即用”技术是指新外部设备自动接入系统中，系统自动识别配置变化，而完全不需要人工干预，其作为工业标准化技术的理念已经在各领域广泛应用，运用即插即用技术可以使整个系统操作简便、效率高、采集数据可靠、显示灵活、动态配置方便。

智能变电站发展中设计、建设和运维三个阶段所遇到瓶颈，正可以通过引入“即插即用”的技术，更简单灵活地将设备集成到系统之中，系统具有更强的可扩展性、更高的自适应性，也是 IEC 61850 互操作深层次的推广应用。

2 智能变电站全寿命周期的“即插即用”技术

由于智能变电站建立在 IEC 61850 标准体系基础之上，使得“即插即用”技术在变电站全寿命周期的应用成为可能，该技术的应用将会缩短变电站整体建设周期，提升智能变电站设计、建设、运维的工作效率和管理水平，对成本节约、节能环保等有着重要促进作用。文章将从设计、建设、运维三个方面介绍“即插即用”技术在智能变电站全寿命周期中的应用。

2.1 智能变电站设计的即插即用技术

2.1.1 虚端子自动关联技术

目前变电站智能二次设备的虚端子链接方法仍然是点对点的连接，本质上与传统的电缆接线没

有太大区别,抽象的虚端子反而增加了回路设计、配置的工作量,未能充分利用 IEC 61850 富有丰富语义的抽象表达方式^[2-3]。

基于一次系统与二次设备模型关联关键技术,对一次系统与二次设备逻辑节点之间的关联进行探讨,提出 SSD(System Specification Description)一次系统描述文件的所有元素及其关系。研究 IEC 61850 标准与二次设备之间关联关系的需求、变电站描述与之映射的可能性和基于变电站描述关联的模型相

关性,以及这种相关性与实际物理链接之间的关系。由此实现变电站系统描述部分中导出二次设备间的关联关系,根据此关联关系完成二次设备间的映射配置,即二次设备自动关联识别技术。其流程如图 1 所示。基于一、二次设备关联描述和二次逻辑自描述特性,通过一次系统拓扑链接关系,让传统的没有语意的“点对点”连接变成基于 IEC 61850 标准的功能信息自动关联。由此实现变电站系统二次设备间的映射自动配置。

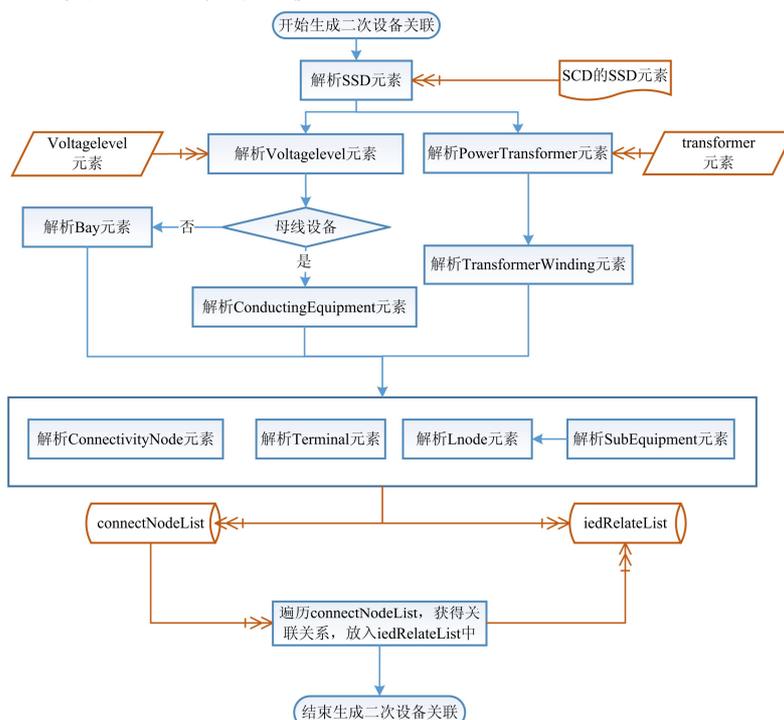


图 1 基于 SSD 文件解析自动关联流程图

Fig. 1 Auto-associated flow chart based on analysis of the SSD

2.1.2 就地分布式保护技术

智能变电站现阶段受制于跨间隔保护不能就地间隔化,以致无法实现间隔设备的纵向集成,结果造成了一、二次设备未能融合,就地间隔化的症结在于如何解决跨间隔保护间的通信。

无主分布式间隔集成保护基于 IEC 62439-3 工业通信网络技术,实现数据共享,保护系统仅由间隔单元组成,没有主单元的分布式二次设备。各间隔单元和其他间隔保护面向一次设备就地安装,既能实现间隔保护测控计量等多功能的集成,又实现跨间隔保护分布式就地化,如图 2 所示。

无主分布式间隔集成保护系统在变电站间隔检修或改扩建中,比较传统集中式跨间隔保护而言,分布式二次设备的“即插即用”技术优势特别明显。

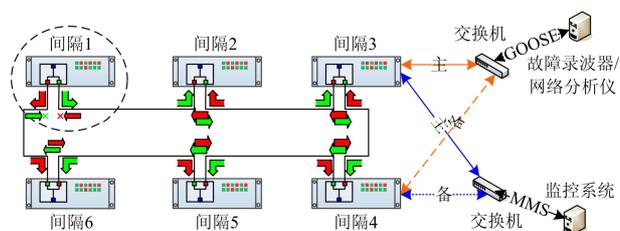


图 2 无主分布式间隔集成保护网络结构图

Fig. 2 Non-master bay integration protection's topology chart

如图 3 所示,间隔单元检修时,只需通过光开关短接检修间隔单元保护的环网链路,即可以实现该间隔单元保护的检修操作。若扩建间隔单元,可以通过光开关,将扩建间隔单元的网络链路预接入至整个环网系统中,即可实现改扩建中的“即插即用”。目前基于此技术的无主分布式环网母线保护已在嘉

兴 220 kV 安江变电站和苏州 220 kV 跨塘变电站投入运行。

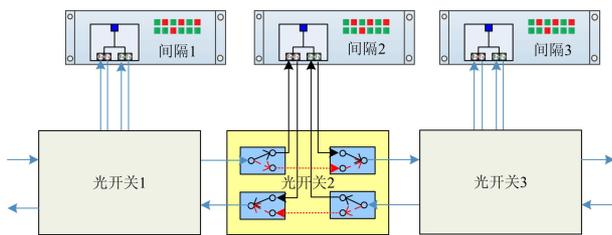


图 3 光开关在分布式单元运维中的应用

Fig. 3 Optical switch application on operation and maintenance of the distributed unit

2.2 智能变电站建设的即插即用技术

随着智能电网的发展，作为变电站控制核心的二次设备建设模式发生了革命性的创新。预制舱作为工厂化加工、模块化安装的设备，代替二次设备室作为容纳二次设备的载体，为二次设备提供良好的运行环境；与传统的建筑物相比，具有节约占地、减少工期、降低成本、节能环保等诸多优点。“标准化设计、工厂化加工、装配式建设”是标准配送式变电站的新模式，“即插即用”则是智能变电站建设新模式的目标。

二次设备舱安装就位接入系统，需要现场熔接光缆，熔接工作对人员、设备及环境要求高，柜内安装复杂，布线凌乱。而采用预制光缆的方案，插拔式，操作简单，对人员、设备及环境无特殊要求，柜内通过光缆数量灵活设置安装板固定光缆，节省空间，布线整洁。现场“即插即用”，施工周期较传统方式可缩短 60%~70%^[4-5]。以预制光缆为物理链接载体，并结合变电站标准化设计规范，完成光纤内传输信号的面向对象标准化设计。从物理载体和信息交互两个方面实现预制舱整体接入“即插即用”。

现有的预制舱多数为钢结构，预期寿命不甚理想。玻璃纤维增强水泥(Glass fiber Reinforced Concrete, GRC)复合材料预制舱，寿命远超过普通钢材材料，利用新材料在保温、抗腐蚀、亲水性方面的优势，提升了预制舱整体的环境适应性、使用寿命等关键性能。舱体采用整体浇筑工艺，无需定期涂刷防锈漆，简化了后期维护的工作，实现了配送式变电站的免维护“即插即用”，已在连云港 110 kV 兴辰变、淮安 220 kV 官滩变工程中应用^[6]。

2.3 智能变电站运维的即插即用技术

2.3.1 全景仿真闭环测试技术

常规继电保护应用最大风险点在二次回路，而对于智能继电保护风险点就在虚链路。比较常规的

二次回路，虚链路不可见、不可测，需要专业的软件工具才能检测，更加增添了运维工作的困难。而又因电网安全稳定经济运行的要求，一次设备停电越来越困难，以致回路整组检修的机会越来越少。研制一种新型检修终端可以通过站控层修改定值和切换定值区，过程层发送控制命令至待检修设备与接收其信号反馈，在不改动原回路的前提下完成设备检修。

利用过程层设备的检修状态，检修终端与待检修设备信息交互，实现从合并单元、待检修设备、智能终端全链路的“一键式”检修，整个检修过程可以在一次设备运行时进行二次设备检修，如图 4 所示。这种基于网络的检修方式也支持远程运维、云端测试的高级应用。

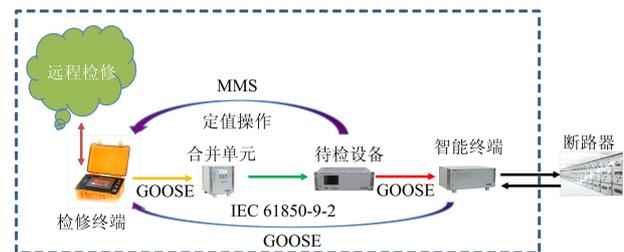


图 4 智能变电站闭环检修系统

Fig. 4 Closed loop maintenance system in the smart substation

智能变电站接入调度控制主站，需要经过大量的信号联调验证工作后才能投入运行，联调验证工作量很大，且易存在疏漏。采用源端维护技术和提供面向调控主站的标准化服务接口，将变电站的图、模、传输信息集和应用功能接口用标准化的形式进行自描述，依靠智能变电站高级应用的系统拓扑自动识别技术，基于业务专家知识库对变电站监控系统各应用进行分层，模拟各层次应用功能的信息交互和业务流程。

由此构建的智能变电站二次闭环自动测试系统，完成了远程检修和调控的“一键式”操作，实现变电站运维系统和接入主站的“即插即用”^[7-8]。

2.3.2 免整定继电保护和智能跳闸

继电保护的定值整定及流转过程目前仍然较为复杂，尤其在运行方式调整后需要重新整定或者切换定值区，往往造成在某些运行方式下灵敏度或可靠性的缺失。在智能变电站中，继电保护可以感知变电站运行方式和获取一次设备参数，就能够根据实时运行方式优化定值，自适应变电站运行方式，统一相关保护设备的逻辑，避免了定值的频繁整定，极大地减少了整定人员的工作量。

站域保护是以变电站为对象的保护控制装置，站内信息收集完备，利用变电站内一次设备状态信息和多个就地保护的中间量，能够在主保护异常的情况下，判别变电站运行方式，精确故障定位，加速跳闸相关设备，同时也避免了单一设备异常造成事故扩大的风险。就地化间隔保护与站域保护协同配合形成智能变电站保护架构上“点面结合”。智能跳闸功能的实现，能够自适应电网系统运行方式的调整。

采用上述技术的国内首套实现灵敏度自动校验免整定和智能跳闸的 220 kV 变压器保护在湖州钮家变电站投入运行，为未来实现保护装置少整定乃至免整定提供了技术方向和经验，给站域集中式保护控制技术的发展提供参考。

2.3.3 保护的“功能迁移”

保护的“功能迁移”技术是基于变电站不同间隔的信息共享，“即插即用”在保护应用功能领域有着两个方向的创新。

一是应用功能的迁移，站域集中式保护实时监测变电站运行的线路保护、变压器保护、母线保护装置工况^[9]。当上述保护出现异常时，尤其在保护单套配置时，因二次设备异常极易造成一次设备陪停。而通过迁移技术，对应的保护功能可由站域集中保护中组态的功能自适应投切实现，避免了因保护缺失，造成一次设备停电的损失，功能迁移过程如图 5 所示。

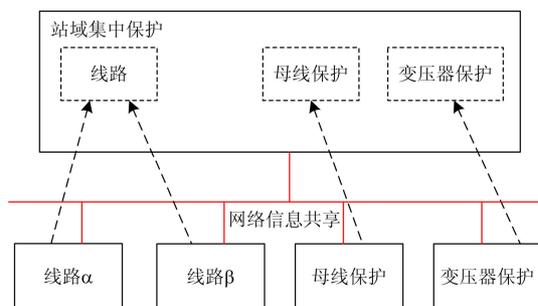


图 5 站域集中保护的“功能迁移”

Fig. 5 Function migration of the station region centralized protection

二是过程层采样回路的功能迁移，当某一间隔的采样出现异常，可以通过相邻回路间隔的正常采样计算出异常间隔的采样，如图 6 所示，间隔 1 和间隔 3 采样功能的迁移实现间隔 P 的采样，由此避免因间隔过程层设备停役，造成该间隔一、二次设备的陪停^[10]。

保护应用模块和过程层采样根据设备运行态势

评估，完成功能自主迁移是保护的“即插即用”技术在继电保护领域深层次的应用。

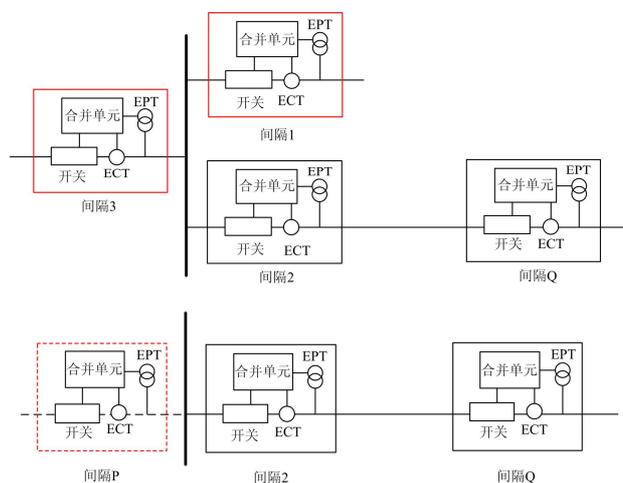


图 6 采样回路的“功能迁移”

Fig. 6 Function migration of sampling circuit

3 结语

智能变电站全寿命周期“即插即用”是技术与标准结合，开启了变电站设计、建设、运维的全新模式。

(1) 虚端子自动关联技术突破了传统逐一点点相连的人工变电站设计，实现了变电站网络构架与设备自动映射的“即插即用”；

(2) 分布式就地化保护系统破解了跨间隔保护无法面向单间隔布置的难题，实现了变电站改扩建时设备的“即插即用”；

(3) 预制光缆与虚端子标准化设计的新材料新工艺的预制舱减少了二次设备舱系统接入的施工工作量和降低了设备调试的难度，实现了设备舱整体的“即插即用”；

(4) 全景仿真闭环测试技术满足了不停电检修虚链路需求，简化了变电站自动化海量联调验证工作，实现了设备运维和变电站接入电网的“即插即用”；

(5) 自动识别系统的免整定、智能跳闸技术和功能迁移解决了因运行方式变化、设备故障造成系统可靠性下降的问题，实现了在运维阶段设备自主的“即插即用”。

智能变电站“即插即用”技术是变电站进一步理论与实践的成果，将“即插即用”的创新技术深度融合于变电站全寿命周期之中，提升系统的安全性、可用性、扩展性。基于网络拓扑结构和态势评估，自主安全措施完成顺序控制和风险隔离，实现

自投切功能迁移。由此形成更广泛、更深入的以“即插即用”技术为理念的继电保护和自动化领域技术发展新形态，为变电站全面实现智能化，完成自诊断、自协调、自恢复的应用提供标准的、可靠的支撑。

参考文献

[1] IEC 61850 communication networks and systems in substations[S].

[2] 高东学, 智全中, 朱丽均, 等. 智能变电站保护配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 68-71.
GAO Dongxue, ZHI Quanzhong, ZHU Lijun, et al. Configuration project of protect unit according to levels for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 68-71.

[3] 高吉普, 张沛超, 何旭, 等. 智能变电站保护系统可靠性的自动分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 107-112.
GAO Jipu, ZHANG Peichao, HE Xu, et al. An automatic reliability analysis method for protection systems in smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 107-112.

[4] 丘栋, 陆以夫, 陈娟, 等. 智能变电站光缆全套解决方案[J]. 广西电力, 2015, 38(1): 57-59, 76.
QIU Dong, LU Yifu, CHEN Juan, et al. A full set of solution to optical fiber cable in intelligent substation[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(1): 57-59, 76.

[5] 孙建龙, 鲁东海. 基于预制舱的配送式智能变电站设计[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 43-47.
SUN Jianlong, LU Donghai. Distribution-mode smart substation design based on prefabricated cabin[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(5): 43-47.

[6] 顾锦书, 袁涤非, 俞春林, 等. GRC 复合材料预制式二次设备舱结构及仿真分析[J]. 华电技术, 2015, 37(4): 25-27.
GU Jinshu, YUAN Difei, YU Chunlin, et al. GRC

composite materials prefabricated secondary equipment cabin construction and simulation analysis[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2015, 37(4): 25-27.

[7] 纪陵, 李忠明, 蒋衍君, 等. 智能变电站二次系统仿真测试和集成调试新模式的探索和研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 119-123.
JI Ling, LI Zhongming, JIANG Yanjun, et al. Exploration and research of smart substation secondary system simulation testing and integration testing new mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 119-123.

[8] 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]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 31(7): 105-109.

[9] 丁毅, 陈福锋, 张云, 等. 基于背板总线的站域保护控制装置设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 102-107.
DING Yi, CHEN Fufeng, ZHANG Yun, et al. Design of substation-area protection and control equipment based on backboard bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 102-107.

[10] 申泉, 赵谦. 智能变电站全生命周期内 IED 即插即用技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 162-167.
SHEN Quan, ZHAO Qian. PNP technology of IEDs for whole life cycle of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 162-167.

收稿日期: 2015-04-06

作者简介:

刘颖(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能变电站及继电保护业务相关的研发管理及产业化工作。

(编辑 周金梅)