

中国变电站二次系统技术发展趋势分析

李明节¹, 刘宇¹, 舒治淮¹, 周泽昕², 李仲青², 窦仁晖², 窦雪薇²

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Development Trend of Secondary System Technology in China's Substations

LI Mingjie¹, LIU Yu¹, SHU Zhihuai¹, ZHOU Zexin², LI Zhongqing², DOU Renhui², DOU Xuewei²

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The substation secondary system undertakes the tasks of protecting, controlling, measuring and monitoring of the power grid and its equipment in order to realize the real-time collection and delivery of the data and information about operating, alarming and monitoring, which is crucial to ensure the safe and stable operation of the power system. This paper summarizes the technical characteristics of several main development stages of Chinese substation secondary systems and the construction experiences of the intelligent substation secondary systems in recent years, and analyzes the shortcomings of the secondary systems at the present stage. By analyzing the factors that may promote the technical progress of the secondary systems, some new developing ideas are put forward from the aspects of the second system structures, the monitoring enhancement, the reliability improvement of the functions and the security defense. In terms of the second system structures, emphasis is laid on the optimization schemes of the whole station, such as the efficient and reliable data collection, the optimization and integration of the equipment functions, the communication network deployment and implementation, and the improvement of the SCD application level. As for the monitoring enhancement, from the angle of satisfying the equipment monitoring and its convenient operation and maintenance, the integrated monitoring scheme of the main and auxiliary equipment is put forward, and the architecture combining the general platform with the open application function of the monitoring system is illustrated. For the reliability improvement of the system functions, some measures are presented, such as improving the reliability of the whole protection system, the ability of the wide-frequency measurement, and the ability of early warning and high concurrent data processing. As to strengthening the ability of

security defense, on the basis of the established boundary protection system, a scheme to consolidate the endogenous security of equipment is proposed. To realize the wireless security access of a variety of new sensor information while ensuring the substation information security. The State Grid Corporation of China will carry out the application practice of the above technical schemes, and constantly summarize and improve them in the construction applications.

KEY WORDS: substation; secondary system; protection; monitoring; security defense

摘要: 变电站二次系统担负着对电网及其设备的保护、控制、测量、监视任务, 实现运行、告警、监视等数据和信息的实时采集与上送, 对保障电力系统安全稳定运行至关重要。总结了我国变电站二次系统几个主要发展阶段的技术特征和近年来智能变电站二次系统的建设经验, 分析了二次系统现阶段存在的不足。通过剖析推动二次系统技术进步的因素, 对二次系统技术发展趋势进行了研判, 从整体架构、监控水平、业务可靠性、安全防护能力等方面提出新的发展思路。在整体架构方面, 重点阐述了全站数据高效可靠采集、设备功能优化整合、通信网络部署实施、变电站系统配置描述文件(substation configuration description, SCD)应用水平提升等优化方案; 在提升监控能力方面, 从满足设备监控和方便运维的角度, 阐明了监控系统的通用平台和开放应用功能相结合的架构, 以及提升远方集中监控能力和监控运维能力的支撑手段; 在提升业务运行可靠性方面, 提出了提升保护系统全环节可靠性、提升宽频测量能力、提升预警能力和高并发数据处理能力等措施; 在加强安全防护方面, 在已经建立的变电站边界防护体系基础上, 提出加强设备内生安全的方案, 在保障变电站信息安全的基础上, 实现多种新型传感信息的无线安全接入。国家电网公司将对上述技术方案开展应用实践, 并在建设应用中不断总结提升。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2401000)。

Project Supported by National Key Research & Development Program of China (2021YFB2401000).

关键词: 变电站; 二次系统; 保护; 监控; 安全防护

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1084

0 引言

变电站二次系统是变电站的核心基础设施,承担着变电站信息采集、实时监视、运行控制和故障隔离的重任,对于电网安全稳定运行至关重要。我国变电站二次系统自 20 世纪 70 年代以来,技术发展历程经历了 4 个特征较为显著的阶段。

第 1 个阶段是从 20 世纪 70 年代到 80 年代,伴随着集成电路技术的发展,继电保护设备从电磁式过渡到晶体管式/集成电路式保护,厂站自动化设备由分立元件构成的自动装置逐渐过渡到以微处理器为核心的远程终端单元(remote terminal unit, RTU),继电保护和测控装置的电气量采集方式为模拟采样、电缆传输,其对外联接主要采用硬接点或串行口通信,扩展性较差,功能受限。

第 2 个阶段是从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,随着微电子、计算机和通信技术的发展,单元式微机保护及按功能设计的分散式微机测控装置得以广泛应用,现场总线和网络技术逐步应用^[1],相对独立的各保护和测控单元可通过计算机通信实现数据共享和协调配合,减少了电缆和设备配置,90 年代中后期的变电站综合自动化系统更多地采用了现场总线型网络技术,传输与处理速度相较于串口通信方式有了大幅提高。

第 3 个阶段是从 2003 到 2009 年,变电站进入数字化变电站时代,信息采集传输向数字、网络化方向发展,二次设备参照 IEC61850 标准和通信规范,采用分层构建方式,能够实现变电站内智能电气设备间信息共享和互操作^[2],这个阶段时间较短,经过一段时间的摸索和尝试,快速进入了第 4 阶段。

第 4 个阶段从 2009 年开始,进入了智能变电站阶段。智能变电站以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本特征,在自动实现信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能的基础上,对一、二次设备状态监控手段逐渐丰富,可支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等智能高级功能,为实现无人值班奠定了技术基础^[3-7]。

1 二次系统技术应用的经验

我国变电站二次系统在进入智能变电站建设阶段后,技术设备整体水平都实现了大幅提升,目前新投运变电站二次系统在整体技术架构上均采用了智能变电站技术体系。二次系统在信息标准化、数字化和网络化方面均实现了快速发展。

在信息标准化方面,全面采用了 IEC61850 系列标准,二次系统主要采用了“三层两网”结构,全站设备基于统一规范的模型进行功能定义和描述,用 SCD 文件确定设备间逻辑关系和数据流向,设备厂家研制满足统一标准规约的二次设备,并经过多轮一致性测试和工程应用不断改进,实现了设备之间的互联互通和功能协同。

在数字化方面,应用合并单元和智能终端等数字化接口设备,合并单元实现间隔电压、电流等电气量信息的数字化转换和同步处理,智能终端实现对一次设备的控制和状态信息的数字化处理,合并单元和智能终端为二次系统的数字化应用奠定了基础,但出于技术成熟度和电网安全运行的要求,在 500kV 以上电压等级继电保护未采用合并单元。

在网络化方面,将以太网应用于二次系统的过程层网络和站控层网络,提升信息的共享范围和交互效率。通过上述技术设备的应用,智能变电站二次系统较常规变电站实现了显著提升,保护、控制、测量和数据通信向一体化发展,推动了光纤和网络的应用,大量取消了传统的二次接线,信息共享能力提升,并为电网和设备的运行监控中各类高级应用功能的实施提供了支撑。现阶段智能变电站二次系统典型结构如图 1 所示。

我国智能变电站的建设为 IEC 61850 标准体系在变电站中的应用和完善积累了大量的实践经验。同时,也在智能变电站建设实践中显现出了一些需要通过技术手段解决的问题。

1) 技术配置有待优化:例如在合并单元应用过程中,由于技术设备成熟度问题带来故障切除时间延长^[8]的问题,一些重要场景的继电保护装置仍经电缆模拟量采样,因此模拟、数字采样方式并存,传输模式不统一,设备端口数量多,回路复杂,运维要求高;二次系统在工程建设中网络结构复杂,交换机数量多,中心交换机异常影响范围大;承载变电站内全部设备和功能的配置信息和关联关系的 SCD 文件缺乏有效的管控手段,信息配置变化可能影响设备逻辑功能,影响范围验证困难,实际工程中在 SCD 配置调整后需要扩大停电范围进行试验验证,变电站运行安全存在风险等。

2) 功能保障存在盲区:变电站二次系统站控层包含多专业的独立系统,缺少整体协调,采集信息冗余和不全的问题并存,设备监控的广度和深度不足;上送实时数据不能完全满足远方监控需求,存在“该有的没有,不该有的有”现象,同时上送方式以单向原始数据上传为主,信息含量不高,对

远方监控的支撑能力有待提升。

3) 安全防护亟待加强: 二次系统及设备间通信认证机制需强化, 通信协议应对网络攻击时的安全性不足; 系统设备存在安全漏洞和开放非必要端口运行的风险; 设备登录、数据访问、操作控制等

缺乏身份认证安全措施, 设备本体安全亟待加强; 无线接入设备等非安全接入方式, 可能造成非可控网络入侵风险。

以上这些问题对智能变电站的应用造成了一些不利影响, 也需要在技术发展过程中逐步解决。

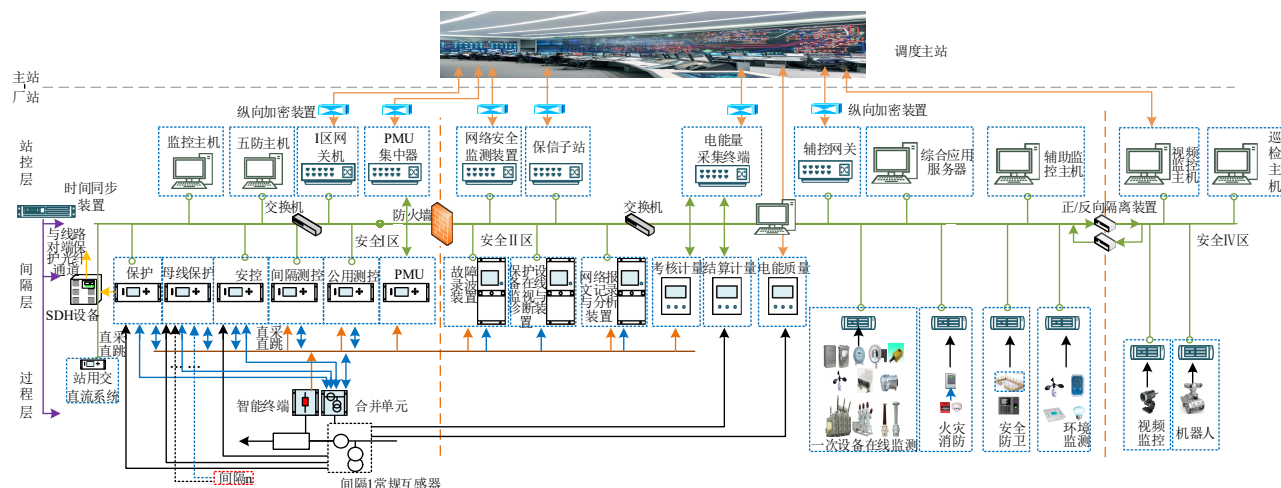


图1 智能变电站二次系统典型结构

Fig. 1 Diagram of typical structure of intelligent substation secondary system

2 二次系统技术发展趋势

变电站二次系统的发展趋势是由变电站运行管理变革、国内外经济社会发展以及变电站二次系统技术发展等因素共同驱动的。

一方面, 以提升变电站运行管理效能为中心开展了管理制度变革和技术改进, 在现阶段最显著的就是变电站由有人值班向无人值班转变, 需要提升变电站二次系统对远方集中监控的支撑能力, 降低变电站全寿命周期内建设和运维成本。

另一方面新型电力系统建设带来的新的电网运行特征, 以及国际形势变化带来的电力安全挑战, 对变电站二次系统业务功能提出的更可靠、更安全的需求, 将推动二次系统的技术设备进步; 同时, 行业内外新材料、新技术、新成果的涌现, 对变电站二次系统技术发展所提供的驱动力, 如新型传感器、高速无线通信等技术成果在变电站的应用, 将推动二次系统对电网和设备运行监控技术的发展, 而大数据、人工智能等技术的发展, 则使二次系统在智能运维方面不断取得新的技术突破。

综上所述, 在多种因素的共同驱动下, 变电站二次系统数字化特征将更加显著, 将通过系统集约精简实现高效支撑, 高效运维支撑能力将持续提升, 而可靠安全仍然是核心需求, 二次系统整体向更集约、更高效、更可靠、更安全的方向发展。

2.1 系统结构集约协同

二次系统在提升管理效能和新技术成果的驱

动下, 将统筹各专业需求, 加强全站数据统一数字化采集、传输和全局共享, 通过提升信息交互和应用能力, 进一步推动二次系统的自动控制、智能分析和智慧运维, 提升系统整体集约化水平; 网络结构扁平化, 提升信息传输可靠性, 支撑各类数字化应用的高效实施; 优化全站功能配置, 实施相近功能设备整合, 避免同质同源信息重复采集, 消除数据烟囱, 减少设备数量, 简化二次回路, 提升运维效率; 强化数字化信息的可视化运维和在线管控, 消除信息在配置和运行中的安全风险, 提升运维安全性。

1) 深化全站数字化应用。

数字化技术是提升信息采集和交互效率的有效手段, 变电站二次系统从信息采集、传输到功能执行的全过程全面实现信息数字化^[9], 是提升二次系统整体性能的基础条件。将持续提高电子互感器、合并单元等数字化信息采集支撑设备技术水平, 优化设计环节, 结合合并单元、智能终端等设备的已有运行经验, 通过优化运行环境、降低功耗及发热、增强防护等级、提升级联通信可靠性、优化继电保护动作时间等措施, 整体提升数字化采集设备的可靠性和性能。未来, 二次系统将统一采用数字化信息采集方式, 统一采用光纤传输, 从源头上实现数字化。

2) 统筹优化设备功能。

在功能可靠的前提下, 提升设备集成度是设备

研制的发展趋势。随着元器件技术性能不断提升，以及二次设备功能不断改进、完善以及在工程应用经验的积累，将对二次设备逐步开展优化集成，既能够有效减少全站设备数量，简化系统结构，同时也有助于有效提升二次设备整体智能化水平^[10-15]。

对于变电站的三层设备的集成整合也会按照各层特点开展(表 1)。

表 1 变电站二次设备集成方案		
Table 1 Scheme of integration of IEDs		
设备位置	原有设备	集成设备
过程层	合并单元 智能终端	采集执行单元
间隔层	继电保护装置	保护测控装置 (110kV 及以下电压等级)
	测控装置	
	测控装置	多功能测控(220kV 及以上)
	PMU 装置	
	故障录波装置	
站控层	网络报文分析仪	智能录波器
	二次设备状态监测	
	数据网关机 PDC 数据集中器	数据通信网关机

①过程层设备集成。

现有智能变电站部署合并单元和智能终端两类设备用于实现信息采集和对一次设备的控制。目前过程层采样有常规采样模式、合并单元和智能终端分开模式以及合并单元智能终端集成模式。在现有技术设备的基础上，进一步优化整合合并单元和智能终端功能为采集执行单元。采集执行单元在采集环节提升硬件性能，数据计算能力增强，优化报文控制，缩短传输延时；在结构设计上采用分板卡独立采集方案，从源头实现完全冗余设计，解决了单一元件异常影响多套设备正常运行的问题。如图 2 所示，实现了采样和跳闸光口合一，显著减少设备数量及光口数量，装置功耗及元器件发热显著降低。由于要满足继电保护点对点传输的要求，因此图 2 方案(b)中虽然实现了二次设备集成，但是由于光口数量太多，装置散热严重，影响了装置的稳定性。采用方案(c)中共网口传输后，装置光口数量减少一半，发热显著降低，既减少过程层设备数量，也简化了回路结构。

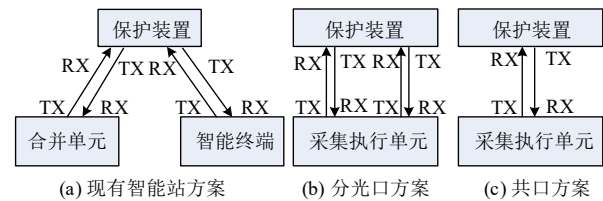


图 2 过程层采集执行单元集成方式

Fig. 2 Integration of data acquisition and control unit of process layer

采集执行单元数据发送采用报文优先级控制和时隙预判技术，解决了报文共口传输的冲突问题，既保证了 SV 报文等间隔发送要求，又实现了 SV 和 GOOSE 报文的共口传输，如图 3 所示。

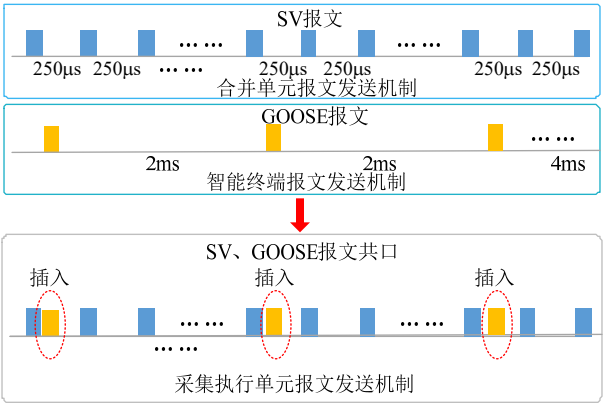


图 3 采集执行单元数据处理机制

Fig. 3 Data processing mechanism of acquisition execution unit

②间隔层设备集成。

变电站二次设备大部分部署于间隔层，且绝大多数设备功能相对成熟，对于信息采集及功能对象相同的设备具备集成整合的条件，通过设备集成，可以有效减少全站二次设备数量，简化系统结构。在现阶段低电压等级已经有保护装置和测控装置的集成，并逐步向高电压等级扩展；而同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)与测控装置的集成，故障录波与网络分析仪、二次设备在线监测设备的集成等也是切实可行的集成思路，并已在实际工程中得到试用。此外，对于同一电压等级的同类设备，在采样数据网络共性的前提下，也可进行集成，形成集中式测控装置等，采用通用的硬件平台设计，实现多个电气间隔的功能集成。

③站控层设备集成。

站控层设备集成涉及到监控设备和数据处理设备。对于站控层内各业务的监控主机功能进行整合，形成部署于安全 I 区承担实时业务的监控主机和部署于安全 II 区承担非实时业务的综合服务主机，前者主要承担数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)的相关功能，与调度运行控制实时相关，后者主要辅助一二次设备状态监测、辅助设备监测等非实时业务的监控。其次，对于站控层中负责与主站进行交互的网关机等设备也进行整合，将 I 区网关机 and PMU 数据集中器集成成为实时网关机，II 区网关机、保信子站、辅控网关机 and 电能量采集终端集成为服务网关机，提升上送数据质量，即简化了系统结构，同时也为数据交互提供支撑。

3) 建立可靠高效的通信网络。

提升信息共享能力是二次系统数字化水平提升的重要环节,利用信息共享优势可提升保护控制系统的可靠性及性能指标。智能站二次回路的设计目标是可靠、清晰、简洁,便于实现设计标准化和提高运维的效率和安全性;为实现上述建设目标,应通过采用合理规范的网络架构实现全站数据可靠共享,实现二次回路设计和二次设备的标准化和集约化。在现阶段,结合以太网技术在变电站中的应用经验,进一步简化网络结构,建立扁平化网络架构,既可减少中间节点数量,提升信息交互效率和传输可靠性,又有助于降低运维工作量,节约建设维护成本。

为提高业务和网络运行可靠性,同时兼顾经济性,网络优化将考虑以下原则。

①取消过程层网络。

合并单元和智能终端集成为采集执行单元后,采用 SV、GOOSE 共口传输,过程层设备的数据传输接口可大幅减少,同时,多数数据的应用集中在间隔内,这些为取消过程层以太网创造了条件。在此前提下,过程层采集设备与间隔层设备通过光纤直连,可有效提升数据采集传输环节的效率和可靠性,降低运维复杂度。

②强化站控层网络共享水平和可靠性。

在过程层取消以太网后,将继电保护、测控等设备跨间隔传输的相关 GOOSE 信息,例如联闭锁信息,通过站控层网络交互,高效利用网络资源。

这类 GOOSE 信息数据量小,对站控层通信网络带宽占用少,不会带来网络性能劣化。通过优化,实现二次系统网络架构扁平化,提升信息交互效率。同时,为保障网络可靠性,降低运维复杂度,在网络数据流量管控^[16-18]和网络配置方面应采取必要的措施。

在数据流量管控方面,虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)、通用多播注册协议(generic multicast registration protocol, GMRP)和静态组播均具有一定限度的流量管理功能,但是均无法有效解决 GOOSE、SV 报文间的干扰问题。为彻底解决报文间相互干扰问题,可在交换机中实现基于组播地址的流控技术,SV 流控门槛基于稳定流量值设定,并留有一定的裕度,GOOSE 流控门槛计及突发情况下可能达到的流量值。针对每路报文进行最大流量值管理方式来限制每路报文在交换机上的最大流量,减少不同类型报文之间的相互影响,提高网络数据传输可靠性。

在网络配置方面,以应用上“即插即用”、运行中消除现场配置出错的风险为目标,将交换机分为隔离交换机和接入交换机两类,隔离交换机将站控层网络分成 3 段,分别接入 A 套保护、B 套保护以及站控层设备和其他单套装置,通过 VLAN 隔离和流量抑制实现 AB 套保护网络独立及网络数据通信。每种类型的交换机参数相同,现场交换机固化配置,提高网络运维效率及质量。站控层网络优化方案如图 4 所示。

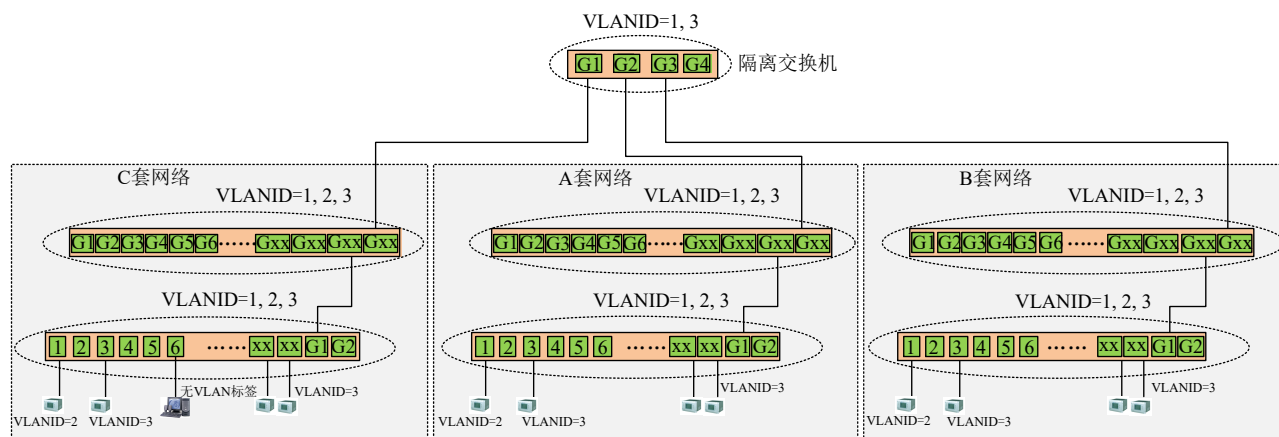


图 4 站控层网络优化示意图

Fig. 4 Network optimization diagram of station control layer

③提高通信协议效率。

针对站控层制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)存在的效率及安全性问题,须制定新型变电站二次系统通信报文规范,在兼容现有二次设备模型和配置的同时,通过精简

协议栈,替代复杂的 MMS 协议,提升通信处理效率;通过设计并采用压缩报文编码,压缩最常用的定长数据编码,减少报文长度,提高编解码效率;通过设计高效的报文交互服务,使用新的服务原语,实现单次通信过程中的多数据和控制块读写,

支持多路请求并发封装,提高通信交互效率;针对嵌入式的保护测控设备进行协议优化,支持长数据分段传输和断点重传,支持不同优先级的通信服务有序发送。同时,支持安全认证和加密传输,安全性显著加强。

4) 管控有效的逻辑配置。

智能变电站采用 SCD 文件描述全站功能信息、拓扑关系、通信参数、工程参数、设备之间的通信配置以及一次系统结构等所有信息,充分体现了电子化手段在变电站建设运行过程中的技术优势。但在应用过程中,由于 SCD 变动后影响范围难以确定、文件配置工具可用性不足,以及文件版本管控等问题没有得到有效解决,导致信息配置及管控成为智能变电站在建设运行过程中的一个困扰和重要关注点。针对上述问题,可以通过配置文件解耦、提升 SCD 文件标准化水平,并结合在线闭环管控,保障全站信息在配置过程中的高效、安全、可控。

①信息标准化配置及解耦。

根据应用需求对 SCD 文件中的信息适当解耦,可有效解决 SCD 文件修改后影响范围不可控的问题。具体方法是在实例化配置时将 SCD 文件中的保护控制设备与动作跳闸等功能相关信息与监控相关信息解耦,形成回路实例配置文件(configured circuit description, CCD)和 IED 实例配置文件(configured IED description, CID),在配置上二者互不影响,监控信息变动不会影响任何的保护控制功能。同时,根据设备需求裁剪 SCD 模型,只保留必需信息,大幅减小 SCD 文件规模,提升效率。解耦方案如图 5 所示。

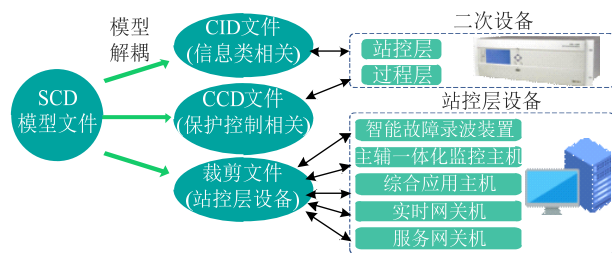


图 5 SCD 文件解耦示意图

Fig. 5 Diagram of SCD decoupling

实现 SCD 文件中设备功能和模型信息配置标准化,避免重复配置,是建立 SCD 文件完整模型的基础,进而更加简化 SCD 文件配置。在标准化的基础上固化信息配置,减少现场修改验证工作量。对于单间隔设备,在变电站基建阶段下装二次回路配置信息后,在变电站投运后可以免配置;对于跨间隔设备,在变电站基建阶段,二次回路按终期规模配置预留间隔,在改扩建阶段,在一次主接

线拓扑不发生变化的情况下,跨间隔设备投入预留间隔,改扩建过程中不需要重新配置回路信息,避免对运行间隔重新传动测试而造成不必要的停电,减少运维工作量。

②提升配置工具易用性。

SCD 文件采用变电站配置语言(substation configuration language, SCL)描述,信息展示不直观,检查校对困难,需要依赖系统配置工具查看设备之间的通信连接关系。配置工具对于运维人员十分重要,配置工具的水平直接影响使用的主动性和有效性。通过优化配置工具的易用性,屏蔽无关细节,将抽象信息转成可视化信息,使配置工作更符合传统工作习惯,效果等同于查阅传统站的二次设计蓝图,便于运维人员清晰查阅和应用。

③配置文件在线管控。

由于二次系统的通信和功能实现均依赖于 SCD 文件,因此对配置文件的管控水平直接关系二次系统的运行安全性。尽管目前一些变电站进行了 SCD 文件版本的离线管控,但其尚不能完全满足二次系统建设运行中的需求。通过将配置工具统一部署在站控层应用服务器,确保单点作业,可以防止多处配置造成重复配置和产生矛盾。同时,增加版本管理和配置文件自动验证功能,对间隔设备分别计算信息校验码,用于运行监控和配置修改校对,杜绝运行设备与全站 SCD 文件之间配置不一致,确保配置安全有效;对于跨间隔设备的配置文件按间隔管理,改扩建过程中配置文件修改仅影响扩建间隔,影响范围可观、可控,实现配置文件在线管控,配置变动可追溯比对,实现 SCD 文件全生命周期内的有效可控。

2.2 监控运维智能高效

要实现远方高效集中监控,变电站二次系统必然要实现从平台到应用的多环节提升,构建站端“平台+应用(APP)”的开放共享软件架构和应用生态,专业应用 APP 化灵活配置,提升变电站整体智能化水平;提升站端分析处理能力,减少原始数据远传,强化智能告警、远程服务等功能,提升主、子站间业务协同能力;提升设备全面感知能力,全面规范接入辅控信息,实现变电站主辅设备一体化监控,提升智能应用和远程运维技术手段,全面支撑远方集中监控业务,实现对电网和变电站设备的全景全息透视、多级精准监控。

1) 通用开放的监控平台。

当前变电站监控系统,通过 IEC61850 协议,实现与站内设备的互联互通,但是不同厂商监控系

统内部的数据、服务实现方式互不兼容,第三方应用不能直接访问。对于变电站新增业务功能,须通过监控系统厂商实现,或者独立部署系统实现。当前监控系统封闭的生态,导致优秀的第三方应用推广困难,数据烟囱增多,且新增应用功能限于监控系统厂家实施,无法更好的通过生态竞争择优,监控系统平台开放势在必行^[19]。

未来监控平台将向开放式平台+专业应用 APP 的方向发展,实现一个监控平台,多业务应用支撑。其架构如图 6 所示,包含基础平台构建、专业应用规划以及安全支撑技术三方面内容,实现监控平台对多形态应用的数据及服务支撑,同时基于国产操作系统安全隔离技术,保障监控系统、专业应用的安全稳定运行,避免非法应用带来的破坏。

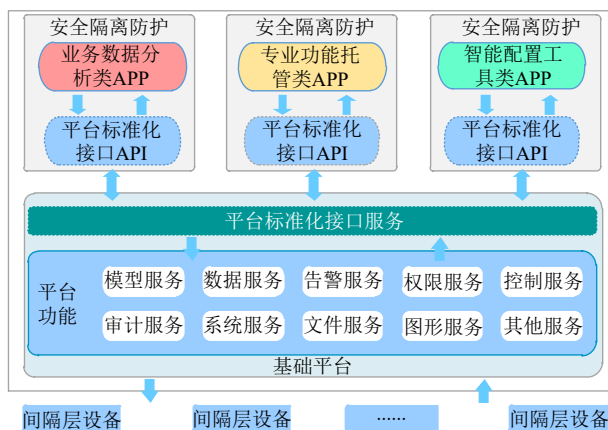


图 6 开放平台+APP 架构图
Fig. 6 Open platform + APP architecture

2) 提升远方集中监控支撑能力。

近年来,随着电网建设发展,变电站数量急剧上升,运维工作量持续增长。据不完全统计,2012—2020 年以来,国家电网变电站数量增加了30%左右,面对新型电力系统设备状态精准感知的要求,监视信息量几何级增长,传统驻站运维模式已不适应经济发展状况。设备监控将向变电站无人值班、远方集中监控的方向发展^[20]。

远方集中监控技术背景下,主站需要及时准确、深入全面地掌握变电站设备内部运行状态、外部工况指示以及变电站环境状态等,在远方实现变电站全面监控。若要实现多个变电站集中监控,采用变电站全量数据上传势必对主子站通信及主站处理带来极大冲击,突破高并发实时数据处理难题,需要从变电站监控系统与主站业务协同角度出发,从变电站主辅一体化监控、站端智能分析处理、主子站服务协同三方面提升对远方集中监控的技术支撑能力,如图 7 所示。针对高并发海量数据远方通信压力,通过站端功能服务化封装及自动编

排,实现高并发数据的有序处理;针对主站全景全息监控要求,通过覆盖全站设备的全息多层次透视技术,实现变电站设备状态灵敏感知及精准监控。

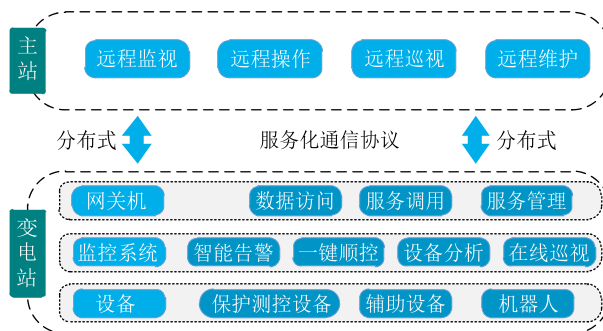


图 7 远方集中监控技术支撑示意图

Fig. 7 Diagram of remote centralized monitoring

①实现主辅一体化监控。

从监控广度上覆盖一次设备、保护测控等传统主设备、二次设备,以及消防、安防、动力环境等变电站辅助设备。同时还需结合视频、机器人等技术^[21],实现对设备外部指示、周边环境的进一步感知,从而最大程度上减少变电站就地人员巡视、操作位置确认等工作。从监控深度上,覆盖被监控设备的内部工况等细粒度信息,实现设备运行工况的准确判断,提升对设备全面深入监控的能力。

②提升数据智能分析处理能力。

主、辅设备全景信息数据量大,须最大化发挥变电站监控系统的计算能力,按照就近处理的原则,在站端进行分析处理,减轻全景数据对主子站通信通道及主站集中分析处理的压力。在变电站监控系统部署智能告警应用,实现对实时数据的归纳处理;部署一键顺控应用,实现现场设备安全快速操作;部署一二次设备状态分析应用,实现对设备健康工况的及时分析;部署在线智能巡视系统,利用摄像头、机器人采集的视频、环境数据,实现对开关刀闸位置的多源确认、对设备外观锈蚀、变形异常智能识别。

③构建主子站服务协同的远方集中监控体系。

随着边缘计算技术的发展,数据通信网关机可基于容器化、微服务技术向边缘网关的形态演化,从单独实现数据上送及协议转换工作,提升为与监控系统共同构成可扩展服务资源体系,具备与远方集中监控采用基于服务编排的主子站通信协议^[22]进行协同的能力。随着 AI 技术的发展,网关机可以通过执行就地自治策略的方式升级协同力度,进一步降低海量数据向远方集中监控传输的频度,提升主子站数据交互的价值密度,降低对现有的主子站通信网络冲击。

3) 提升宽频域测量、精准预警和高并发数据处理能力。

①拓展电网宽频域信号测量能力。

高比例新能源大规模接入和高比例电力电子设备的接入,给电网引入了大量高频信号并引发了一系列振荡事件^[23],且振荡的信号逐步从低频向高频发展,很多振荡信号都属于间谐波信号的范畴,现有的测量装置仅关注工频信号的测量,不具有间谐波信号的测量能力。因此,为有效应对这一挑战,有必要改进提升现有的采集和测量技术,实现电网宽频域信号的高频采集、统一测量。通过不低于12.8kHz的高频采样实现电网宽频域信号的统一采集,采用分类处理的方式实现电网0~2500Hz范围内基波、间谐波和谐波的统一测量,并实时监测电网低频振荡、次/超同步振荡、中高频振荡等宽频振荡,有效弥补现有工频信号测量的局限,为电网的运行监测提供新的技术手段。

②提升高并发数据的处理能力。

基于操作系统亲和调度特性进行网络接入、CPU处理、IO访问、应用处理的全环节资源均衡分配,实现多源异构数据快速处理,满足一二次设备,以及消防、安防、机器人等辅助设备信息实时采集要求,建立灵活可扩展的主子站服务化通信机制,进行主子站业务协同,实现主站对变电站监控系统的功能按需调用及全景数据按需访问,为主站全景监控提供全面可靠的数据支撑。

③提升设备运行状态的精准预警水平。

推动监控系统的深度分析能力提升,进行主辅设备量测、状态量、录波报告、设备音视频等多源异构数据的信息融合,以设备为对象实现数据统一管理及快速访问,构建安全开放的监控平台,支撑设备专业分析应用的直接部署,结合设备状态诊断算法^[24]、数据趋势分析、机器学习等技术进行设备健康工况多参量协同分析,准确高效的识别设备异常,及时预警。

4) 提升智能运维能力。

面对监控系统多专业业务支撑、与主站集中监控业务协同的发展趋势,变电站监控系统功能模块及接入信息量增加,为提升运维效率,将在统一信息模型及源端维护的基础上,向一体化运维、自动化运维的方向发展,实现监控画面自动成图、信息自动对点,进而实现操作控制、信息综合分析 with 智能告警、运行管理和辅助应用等功能,进一步提升运维的自动化、智能化水平。

①监控系统自动成图。

变电站主辅设备全面监控,对监控图形提出主辅设备信息全面可视、展示方式多样化等更高要求,需要在图形上深度融合主辅设备信息,综合展示接线图、电气量、非电气量、主辅设备通信状态及异常告警信息,通过友好直观的图形支撑大信息量下的运维人员高效监盘操作。监控系统自动成图,以主辅设备信息模型标准化为前提条件,通过分析变电站主辅设备SCD模型中信息关联关系及设备拓扑连接关系,基于满足各地区图形习惯要求的成图规则库,自动生成主接线图及间隔接线分图。在变电站、集控站信息模型共享的发展趋势下,统一信息模型加自动成图技术可同时满足变电站、集控站监控系统自动化组态,技术上支撑变电站、集控站显示画面统一,更好地支撑集控站进行变电站远程全面监控。

②监控信息自动对点。

目前通信对点在二次系统调试工作中占很大比重。信息点表规模大、核对对象多、核对链条长增加了对点工作的复杂性。自动对点技术需要解决复杂环境下的验证正确性问题,实现比人工对点更高的准确率及对点效率。自动对点需要研究SCD文件配置和在线管控,以及变电站、集控站、调度主站统一模型及源端维护技术,技术上确保变电站、集控站、调度系统中信息点名称一致,采取分段验证的方式实现站控层设备与间隔层设备通信自动对点及主子站信号自动校核,进而提高验收工作的效率和可靠性。

③智能告警。

智能告警通过建立变电站的逻辑模型并进行在线实时分析,实现变电站告警信息的分类分组、告警抑制、告警屏蔽和智能分析,自动报告变电站异常并提出故障处理指导意见,也为主站分析决策提供依据。通过听觉和/或视觉的方法,提醒运行人员注意电网和变电站运行状态的变化,并对可能出现的故障和异常采取行动,其次是采集告警时刻的各项状态信息以支持事后的调查和分析工作。智能告警的实施需要消除无效告警,例如告警抖动、瞬时告警、过时告警、冗余告警等;减少丢失重要告警的可能、减少运行人员的监控负担;帮助运行人员及时对故障做出判断并采取正确的处理措施。

④故障分析。

故障分析通过实时接收二次设备提供的各类信息,对变电站故障信息进行管理和分析,在电网发生故障时,综合利用各类信息自动分析故障类型、故障相别、故障地点等,并对继电保护、断路

器跳、合闸的动作性能进行分析。通过准确、及时的故障分析,能够使运行人员更好、更快地了解故障状况,快速做出处理,减少故障所造成的损失。

⑤智能联动。

智能联动是通过设置主辅设备间、辅助设备间智能联动策略,利用多系统间的数据融合、协同控制,快速处理异常事件。当变电站内部一次或二次设备发生故障或异常时,各类辅助设备联合进行联合监控并进行相关的告警或控制操作,实现对故障或异常的监视、告警或排除等功能。要实现智能联动,需要提出变电站内横向跨区联动信息扩展的协同方案和业务协同联动的数据融合机制,支撑变电站内设备信息共享和多业务协同,进而提升智能联动水平。

2.3 业务功能运行可靠

继电保护是电力系统安全运行的第一道防线,也是二次系统的核心业务功能之一。完整的继电保护系统由采集、传输、算法、控制环节组成,共同实现保护功能。提升保护系统各环节可靠性是防止电网故障影响扩大的有效手段。采取的技术措施主要有硬件与软件冗余设计、硬件选型与可靠设计、噪声抑制、监测与自检、原理算法优化等^[25]。长期以来,继电保护系统各环节的可靠性主要基于工程应用中的问题和经验来完善,缺乏系统性研究和验证。继电保护采集传输控制、自检与监测、原理算法方面的可靠性提升技术是需要重点关注的方面^[26]。

1) 提升采集、传输及控制环节可靠性。

数据采集、站内/间传输与控制环节,都是影响继电保护系统可靠性的重要因素。运行经验表明,继电保护的很多不正确动作和异常告警都与这些环节的异常有关。目前通过装置的硬件冗余设计、高可靠器件选型和设计、噪声干扰的抑制和滤除算法等措施,取得了一定成效,但工程中仍暴露一些问题,如电流互感器暂态传变导致非故障相产生异常差动电流尖波,可能造成保护不正确动作等^[27]。这些方面可以采取的技术措施,包括采集环节数据传变异常快速识别、控制环节虚回路异常识别与防误技术,对于保护站间通信,可以采用全光复用传输技术,消除电信号干扰与光电转换延时,实现保护信号站间高可靠、超低延时传输的技术。

2) 提升对保护系统缺陷隐患的自检与监测能力。

采取自检与监测措施,及时发现并消除保护系统的缺陷和隐患可以大幅提高装置的可靠性。一般

微机保护依靠自检实现对保护装置和二次回路的监视和缺陷隐患的辨识,但仍有不足,例如在设备芯片级监测方面,以及依靠设备自身数据难以识别的异常或正常情况下没有明显异常特征的隐性异常辨识等方面。对此,有必要研究芯片级信息深度监测技术、基于多维数据与逻辑关系的保护设备隐性异常在线监视与综合分析技术,以及基于外部扰动响应与多元信息特征分析的回路隐性异常在线监视与诊断技术,实现保护系统缺陷隐患的自检与在线监测。

3) 提升原理算法对新型电力系统特征的适应性。

随着新型电力系统的发展,带来风电、太阳能等新能源大规模接入电网,电力电子化器件的控制策略、参数及控制响应过程会深刻影响电力系统的故障特征,同时谐波含量显著增加,导致传统交流保护原理灵敏性、可靠性、选择性和快速性均受到严重挑战,甚至可能导致保护失效。已有研究表明,大规模新能源集中送出电网发生的多起交流汇集线路和母线继电保护装置故障识别灵敏度下降的情况,均与新能源电源故障响应特性紧密相关,已引起业内高度关注。因此,研究不受新能源短路电流受控特性导致故障特征弱化影响的保护新原理,提升保护灵敏性和速动性,已成为满足新型电力系统安全稳定运行的必然性需求。

2.4 内生安全主动防御

现阶段变电站安全防护体系重点围绕边界防护构建,现有防御体系的重要特征是基于威胁特征感知的精确防御,属于“后天获得性免疫”。而主动性安全思维将内源性安全技术和安全设计融入到关键设备和系统中去,构建内生安全的主动防御能力^[28],将对二次系统安全防护发挥重要作用。内生安全改进了以往“设备+安全”的外挂式部署,追求设备本体即具备适度有效的安全性目标,其技术集合涉及到硬件及基础软件受攻击面最小化、访问控制、可信计算、拟态防御、数据安全处理、过程审计等一系列内容^[29]。内生安全不主要依赖于先验性特征库,其重要特征是能有效应对不确定性网络攻击风险。

在设备本体的内生安全设计中,可信计算和拟态防御是建立主动免疫能力的有效技术手段。可信是一种运算和安全验证并行设计的新计算模式,采用密码技术实现身份识别、状态度量、保密存储等功能,及时识别“自己”和“非己”,在设备内部建立程序执行的白环境基线,并进一步可以将可信

验证延伸到设备之间的通信连接、业务交互的安全确认,从而以可信任的确定性来建立系统应对不确定性攻击的防御能力。拟态防御则是通过构建一种动态异构冗余的并行架构,采用冗余的异构等价执行体及动态反馈裁决机制,以变结构来构造熵不减系统,屏蔽攻击认知和阻断有效攻击路径的形成,从而建立起自我保护的内生免疫体系,有效应对外部复杂多变的攻击风险。

采用内生安全设计并不是抛弃边界防护,变电站二次系统的安全分区、隔离认证的边界防护措施必须得到增强,尤其是对无线终端等开放性网络节点应该强化对通信接入的安全管控,在通过汇聚单元、安全接入网关、以及网络隔离装置实施安全接入的时候,应该考虑身份合法性认证的轻量化设计,确保核心生产控制区域的安全边界有效性的同时建立一种便捷可靠的无线接入安全管控机制,以支持应用上越来越多的无线通信方式。

实际上,安全的最终目标是保障业务的正常连续性,有必要从面向业务的角度来更高更全面规划业务安全保障方案。在结构性边界防护的基础上,融合设备及系统的内生安全设计以及数据处理安全机制,并对网络空间进行持续监测和评估预警,再结合业务核心的操作防误和模型安全管控,进而构建“结构性边界防护+设备内生安全+数据处理安全+核心业务安全+实时安全监测”的综合性业务安全防护方案将成为一种技术趋势。

3 结论

本文回顾了我国变电站二次系统近年来技术发展过程,总结了变电站二次系统的建设经验和存在的问题,并结合变电站二次系统技术发展的内部和外部驱动因素,分析了变电站二次系统的技术发展趋势。

1) 变电站二次系统将坚持数字化发展方向,提升二次系统数字化应用能力、设备集约化水平,推动网络架构扁平化,通过新技术、新设备的应用,推动二次系统性能提升。

2) 变电站二次系统须提升设备监控能力,通过加强监控深度和广度,加强数据获取和应用水平,为远方集中监控提供支撑手段,实现对电网和变电站设备运行情况的全景全息透视和多级精准监控,适应变电站无人值班运维模式的转变。

3) 业务功能要具备更高的可靠性,通过采集、传输、算法、控制和监视的全环节优化来提升测量能力、故障识别能力、预警能力及数据处理能力,提

升继电保护等业务功能在新应用场景下的适应性。

4) 变电站二次系统应建立主动安全防御体系,通过内生安全、边界防护、实时安全监测相结合的综合防护手段,实现变电站二次系统在数字化和网络化转型后的安全可靠运行。

参考文献

- [1] 杨奇逊. 变电站综合自动化技术发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 145-146.
YANG Qixun. Development trend of integrated protection and control in power substations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 145-146(in Chinese).
- [2] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61-65.
WU Zaijun, HU Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65(in Chinese).
- [3] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48.
HUANG Yizhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48(in Chinese).
- [4] LI Shulan. Smart grid construction with Chinese features[J]. Electricity, 2010, 21(2): 10-13.
- [5] 李振海, 唐金锐, 熊斌宇, 等. 基于新息加权自适应 UPF 算法的智能变电站 PTP 主时钟源校准新方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1662-1671.
LI Zhenhai, TANG Jinrui, XIONG Binyu, et al. A novel calibration method for the master PTP clock in smart substations using new information sequence weighting and adaptive unscented Kalman particle filter algorithms[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1662-1671(in Chinese).
- [6] 张海洋, 吕飞鹏, 王永福, 等. 智能变电站二次安措可靠性分析与优化[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1566-1573.
ZHANG Haiyang, LÜ Feipeng, WANG Yongfu, et al. Reliability analysis and optimization of secondary safety measures for smart substations[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1566-1573(in Chinese).
- [7] 任博, 郑永康, 王永福, 等. 基于深度学习的智能变电站二次设备故障定位研究[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 713-721.
REN Bo, ZHENG Yongkang, WANG Yongfu, et al. Fault location of secondary equipment in smart substation based on deep learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 713-721(in Chinese).
- [8] 朱贺, 丁泉, 程成, 等. 智能变电站合并单元应用现状与展望[J]. 电工电气, 2015(6): 5-9.
ZHU He, DING Quan, CHENG Cheng, et al. Application actuality and expectation of merging unit in smart substation[J]. Electrotechnics Electric, 2015(6): 5-9(in Chinese).
- [9] 丁泉, 李帅. 智能变电站重采样应用研究及其线性插值法误差分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 132-136.
DING Quan, LI Shuai. Application study on resampling in smart substation with error analysis of linear interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 132-136(in Chinese).
- [10] 王永福, 张方正, 王亚飞, 等. 采用虚拟化技术的智能变电站间隔层集群测控装置研制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 169-176, 190.
WANG Yongfu, ZHANG Fangzheng, WANG Yafei, et

- al. Development of virtualization-technology-based cluster measurement and control device at bay level in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 169-176, 190 (in Chinese).
- [11] 樊陈, 倪益民, 申洪, 等. 中欧智能变电站发展的对比分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 1-7, 15.
FAN Chen, NI Yimin, SHEN Hong, et al. Comparative analysis on development of smart substations in China and Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 1-7, 15(in Chinese).
- [12] 倪益民, 杨宇, 樊陈, 等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 194-198.
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary devices in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-198(in Chinese).
- [13] DOS SANTOS A, SOARES B, FAN Chen, et al. Characterization of substation process bus network delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 2085-2094.
- [14] SUHAIL HUSSAIN S M, FAROOQ S M, USTUN T S. A method for achieving confidentiality and integrity in IEC 61850 GOOSE Messages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2565-2567.
- [15] OLIVÁN M A, MARECA A, BRUNA J, et al. An IEC 61850 sampled values-based analyzer for power quality applications on smart substations[C]//2021 IEEE 11th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). Cagliari, Italy: IEEE, 2021: 1-6.
- [16] 赵明君, 吕航, 杨贵, 等. 基于流量控制的智能变电站网络传输可靠性提升方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 141-146.
ZHAO Mingjun, LÜ Hang, YANG Gui, et al. Data transmission reliability promotion scheme in smart substation based on flow control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 141-146 (in Chinese).
- [17] 杨贵, 吕航, 袁志彬, 等. 智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 70-74.
YANG Gui, LÜ Hang, YUAN Zhibin, et al. Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 70-74(in Chinese).
- [18] 杨贵, 吕航, 彭安, 等. 智能变电站过程层网络流量分析及网络优化研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(2): 176-183.
YANG Gui, LÜ Hang, PENG An, et al. Smart substation process layer network optimization and flow analysis[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(2): 176-183 (in Chinese).
- [19] 胡玉莹, 张继驰. 一种先进、开放、规范的变电站监控系统[J]. 东北电力技术, 2021, 42(9): 18-21.
HU Yuying, ZHANG Jichi. An advanced, open and standard substation monitoring system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(9): 18-21(in Chinese).
- [20] 王世坤, 刘故帅, 高嵩. 以流程再造为核心的变电集控站管理[J]. 山东电力技术, 2021, 48(3): 27-31.
WANG Shikun, LIU Gushuai, GAO Song. Management of substation centralized control station with process reengineering as the Core[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(3): 27-31(in Chinese).
- [21] ALLAN J F, BEAUDRY J. Robotic systems applied to power substations-a state-of-the-art survey[C]//Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Foz do Iguassu: IEEE, 2014: 1-6.
- [22] 窦仁晖, 任辉, 姚志强, 等. 变电站国产化站控层服务协议设计[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3268-3275.
DOU Renhui, REN Hui, YAO Zhiqiang, et al. Design of domestic service protocol for substation control level[J]. Power Grid Technology, 2021, 45(8): 3268-3275 (in Chinese).
- [23] GHADIRIYAN S, RAHIMI M. Mathematical representation, stability analysis and performance improvement of DC microgrid system comprising hybrid wind/battery sources and CPLs[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(10): 1845-1855.
- [24] ANTOUN C. High voltage circuit breaker and power transformer failure modes and their detection[C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Perth: IEEE, 2018: 1-6.
- [25] ZHANG Peichao, PORTILLO L, KEZUNOVIC M. Reliability and component importance analysis of all-digital protection systems[C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta: IEEE, 2006: 1380-1387.
- [26] GRYZLOV A A, GRIGOR'EV M A. Improving the reliability of relay-protection and automatic systems of electric-power stations and substations[J]. Russian Electrical Engineering, 2018, 89(4): 245-248.
- [27] 陈建玉, 孟宪民, 张振旗, 等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 54-56.
CHEN Jianyu, MENG Xianmin, ZHANG Zhenqi, et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 54-56(in Chinese).
- [28] 徐恪, 付松涛, 李琦, 等. 互联网内生安全体系结构研究进展[J]. 计算机学报, 2021, 44(11): 2149-2172.
XU Ke, FU Songtao, LI Qi, et al. The research progress on intrinsic internet security architecture[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(11): 2149-2172 (in Chinese).
- [29] RAHIMINEJAD A, PLOTNEK J, ATALLAH R, et al. A resilience-based recovery scheme for smart grid restoration following cyberattacks to substations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 145: 108610.



李明节

在线出版日期: 2023-08-18。

收稿日期: 2023-06-21。

作者简介:

李明节(1963), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统运行与控制工作,
E-mail: li-mingjie@sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)