

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201652

基于间隔功能动态部署的智慧变电站集群测控装置研制

任志航¹, 邓茂军¹, 王磊², 樊占峰¹, 倪传坤¹, 余高旺¹, 李旭¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网河南郸城县供电公司, 河南 郸城 477100)

摘要: 智慧变电站集群测控装置采用通用的软硬件平台和过程总线技术, 基于 IEC 61850 标准, 集成智慧变电站多个间隔的测控功能。采用即插即用的思想, 面向间隔设计, 将实体测控装置虚拟化, 间隔功能动态集成、灵活部署, 适应智慧变电站的不同应用场景, 满足改扩建便利性要求。通过配置“单间隔实体测控装置+集群测控装置”, 集群测控装置中各虚拟测控单元与单间隔实体测控装置一一对应, 实体测控装置故障后自动切换到集群测控装置中对应的虚拟测控单元, 实现了智慧变电站测控功能的集中式后备。试验验证和工程应用表明, 集群测控装置缩短了设备故障导致测控功能失效的时间, 提升了智慧变电站自动化系统的可靠性。

关键词: 智慧变电站; 集群测控; 动态部署; 虚拟化; 冗余备用

Development of a smart substation cluster measurement and control device based on interval function dynamic deployment

REN Zhihang¹, DENG Maojun¹, WANG Lei², FAN Zhanfeng¹, NI Chuankun¹, YU Gaowang¹, LI Xu¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Henan Dancheng Power Supply Company, Dancheng 477100, China)

Abstract: The smart substation cluster measurement and control device adopts a common software and hardware platform and process bus technology, based on IEC 61850 standard, and integrates the multiple interval measurement and control functions of the smart substation. Adopting the plug-and-play concept, the bay design is oriented, the physical measurement and control device is virtualized, the bay function is dynamically integrated and deployed flexibly, adapting to different application scenarios of smart substations, and meeting the convenience requirements of reconstruction and expansion. By configuring "single bay physical measurement and control device + cluster measurement and control device", each virtual measurement and control unit in the device corresponds to the single bay physical measurement and control device. After the physical measurement and control device fails, it will automatically switch to the corresponding virtual measurement and control unit in the cluster measurement and control device. The centralized backup of the measurement and control function of the smart substation is realized. Test verification and engineering applications show that the cluster measurement and control device shortens the time that equipment failure causes the measurement and control function to fail, and improves the reliability of the smart substation automation system.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-201946264A-0-0-00) and the Central Plains Science and Technology Innovation Leading Talents Program of Henan Province (No. 204200510007).

Key words: smart substation; cluster measurement and control; dynamic deployment; virtualization; redundant backup

0 引言

随着电网和计算机技术的快速发展, 数据采集和处理能力不断增强, 监控系统功能取得了长足发

展, 但监控系统对各类信息的可靠性、及时性要求仍未得到全面满足。220 kV 及以上电压等级智能变电站的测控功能独立配置, 110 kV 及以下电压等级智能变电站保护测控功能一体化配置。目前变电站测控功能通常采用单套配置, 即每个间隔只配备一套测控装置, 当该间隔测控装置故障或检修退出运行时, 该间隔测控功能失效。另外, 间隔测控装置

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5100-201946264A-0-0-00); 中原科技创新领军人才计划资助(204200510007)

故障后不能快速识别，完全依赖运行人员的技术水平与经验。若出现数据错误等不易发觉的故障，则运行人员的判断时间可能很长，严重影响远方调控中心及变电站监控系统的安全运行。

2016年国调中心完成了“四统一四规范”测控装置技术规范编制，统一了装置外观接口、信息模型、参数配置和应用功能，为集群化测控装置研制奠定了技术基础。国家电网公司2017年自动化专业年会提出了变电站自动化技术发展框架，在站内设备的重点发展方面提出了研制集群测控装置的需求^[1-4]。国内曾经通过配置双重化间隔测控装置实现测控功能冗余，但双重化配置增加了设备数量、运维工作量及投资成本^[5-8]。国外主流厂家淡化了测控装置的概念，在统一的平台上根据用户需求配置测量、控制、同期功能，甚至可以配置保护功能。测控和保护功能的简单集成，一方面无法适应复杂电网下的数据接入，另一方面对现场配置工作提出了更高的要求，不利于大规模地推广应用。

通过研制智慧变电站集群测控装置，解决目前变电站间隔层测控装置为单套配置，装置故障后测控功能存在单点故障导致数据中断、遥控失效的隐患。智慧变电站测控功能采用单间隔实体测控装置+集群测控装置的配置模式，集群测控装置中各虚拟测控单元与智慧变电站单间隔实体测控单元一一对应，集群测控装置中各虚拟测控单元采用与实体测控单元相同的模型、参数和配置等，当实体测控单元故障后切换到集群测控装置中对应的虚拟测控单元，解决间隔层测控功能无冗余备用问题，缩短设备故障导致测控功能失效的时间，提升智慧变电站监控系统的可靠性。

1 单间隔+集群测控功能冗余切换方案

智能变电站采用“三层两网”的分层架构，通过采用 IEC 61850 协议，实现了变电站信息的数字化采集和网络化传输，为间隔层测量、控制功能的集成奠定了基础^[9-11]。集群测控装置集成多个间隔的测控功能，可同时运行多个虚拟测控单元，系统架构支持模拟量和状态量信息的数字化采集和网络化传输^[12-13]。

智能变电站间隔层测控功能集成配置方案包括保护测控集成装置、集群测控装置和多功能测控装置。测控功能集成配置方案对比如表 1 所示，从系统可靠性、设备数量、投资成本、运维便捷性、改扩建便利性等多个维度进行对比，提出基于不同电压等级、不同应用场景的测控功能冗余方案。

综合对比分析，“间隔测控+集群测控”冗余配

置方案在设备数量小幅增加的基础上，大幅提高系统可靠性，采用间隔功能动态集成和灵活部署、按间隔“1对1”冗余切换技术，提升智慧变电站的运维便捷性和改扩建便利性。智慧变电站集群测控系统架构图如图 1 所示。

表 1 测控功能集成配置方案对比

Table 1 Comparison of measurement and control function integration configuration schemes

比选方案	测控双套配置	多功能测控单套配置	集群测控双套配置	间隔测控+集群测控配置
系统可靠性	较高	低	高	高
设备数量	较多	较少	极少	少量增加
投资成本	较高	较低	低	略有增加
运维便捷性	差	差	较差，切换逻辑复杂	较好，切换逻辑相对简单
改扩建便利性	较差	较差	较差	好

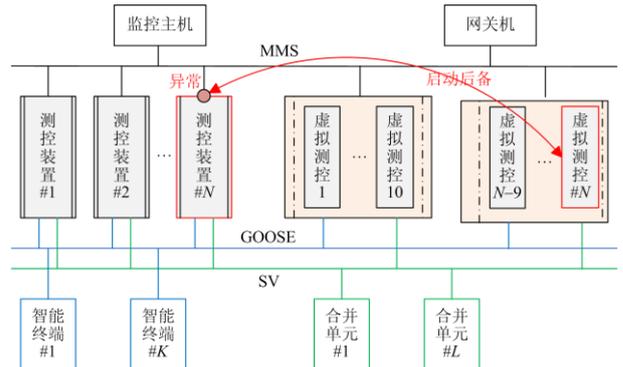


图 1 智慧变电站集群测控系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of cluster measurement and control system in smart substation

集群测控装置集成了多个间隔的测控功能，工程应用中主要有两种集成方式：基于功能相似相关的分组式集成方式和基于电压等级的跨类型动态集成方式。分组指按间隔分组，主要表现为间隔功能的相似相关集成。根据目前变电站间隔测控的应用情况分为线路分组、母线分组、3/2 串分组及主变分组等。分组式集成方式可使装置内共性功能模块得以最大限度地共享，提高数据的共享效率，但在工程应用灵活性和改扩建的便利性方面有待提升。通过研究多模块重定位技术和多模块自动加载管理系统，实现了跨类型间隔功能动态集成、灵活部署，适应变电站不同应用场景，满足改扩建便利性要求。

2 智慧变电站集群测控装置研制

集群测控装置采用横向一体化集成装置设计思想，利用强大的软硬件平台和过程总线技术，基于

IEC 61850 标准, 一台装置集成变电站多个间隔的测控功能, 实现智慧变电站测控功能的冗余^[14-15]。

2.1 硬件平台设计

装置基于通用的硬件平台, 采用 4U 全封闭机箱, 全总线式设计。集群测控装置由 NPI 板、CPU 板、MMI 通信板、开入板及电源板组成, NPI 板、CPU 板及 MMI 通信板可通过总线完成数据共享。NPI 板完成过程层 SV 数据接收及 GOOSE 数据交互, 通信板完成 MMS 网络通信功能, 电源板将 DC220 V 或 DC110V 电源转换成 5 V 及 24 V 电源供装置使用。开入板完成硬开入状态采集, CPU 板完成所有间隔虚拟测控单元的测控数据计算及逻辑处理。集群测控装置背视图如图 2 所示。



图 2 集群测控装置背视图

Fig. 2 Back view of cluster measurement and control device

集群测控装置要求同时运行的虚拟测控单元不少于 15 个, 以四统一测控装置输入输出信息为基准, 按照集成 16 个间隔设计, 包括 8 个间隔测控、4 个 3/2 接线测控和 4 个母线测控, 集群测控装置信息数量统计如表 2 所示, 集群测控装置 SV 报文流量统计如表 3 所示。

根据表 2 和表 3 统计, NPI 板至少支持 4 路过程层通信光口, 支持 2 路千兆通信光口选型。集群测控装置具备存储 SOE 记录、操作记录、告警记录功能, 每种记录存储的条数不少于 256 条。按照集成 16 个虚拟测控单元及装置本体信息考虑, MMI 板应具备 2048 KB 历史记录存储容量, CPU 板应具备 655.36 KB 历史记录存储容量。

表 2 集群测控装置信息数量统计

Table 2 Information quantity statistics of cluster measurement and control device

装置型号	M1 访问点	G1 访问点		S1 访问点	信息合计
		GOOSE 接收	GOOSE 发送		
间隔测控	9	339	57	658	1 063
3/2 测控	13	320	54	655	1 042
母线测控	16	320	62	678	1 076
公用信息	0	0	0	118	118
全部信息	188	5 272	920	10 714	17 094

表 3 集群测控装置 SV 报文流量统计

Table 3 SV packet flow statistics of cluster measurement and control device

装置型号	M1 访问点信息		SV 报文流量/Mbps
	SV 组数	合并单元通道个数	
间隔测控	1	26	281×8×4000=8.992
3/2 测控	2	26	2×281×8×4000=17.984
母线测控	2	23	2×257×8×4000=16.448
16 个间隔合计	8×8.992+4×17.984+4×16.448=209.664		

2.2 软件平台设计

通过分析典型二次功能数值及逻辑运算数据, 抽象智慧变电站集群测控装置数据信息的共性需求, 构建通用的二次业务数据库模型, 平台业务数据库逻辑架构如图 3 所示。通过定义标准化的访问接口, 实现软件功能模块设计的通用性和开放性。

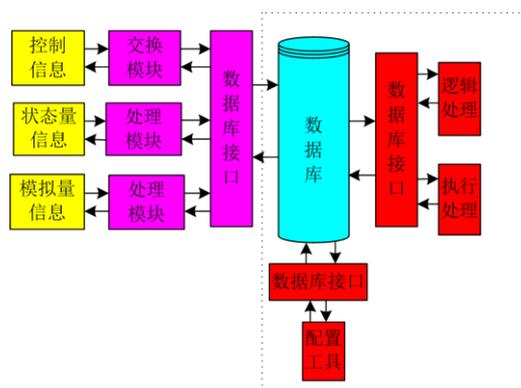


图 3 平台业务数据库逻辑架构

Fig. 3 Platform business database logic architecture

1) 多模块自动加载管理系统

采用多模块重定位技术, 基于嵌入式软件平台的多模块独立编译、自动加载, 实现软件功能模块在装置板卡上的动态集成和灵活部署。通过采用多模块自动加载管理系统, 实现了集群测控装置软件平台、设备驱动、通信管理模块、人机接口和应用等各个功能模块的独立编译和下载。装置上电初始化运行时, 自动识别各个软件功能模块, 通过建立各个模块的初始化工作环境, 自动执行各个软件功能模块的相关操作。多模块自动加载示意图如图 4 所示。

2) 高速数据交互和海量数据存储

基于高速总线的数据共享机制, 采用多处理器协同工作的数据交换机制, 提升装置内部通信的容量、通信速度, 实现装置板间数据可靠、安全的实时共享访问和多源海量数据高速通信交互。根据集

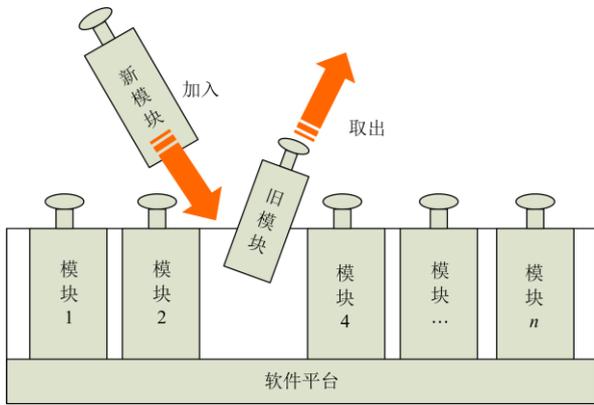


图 4 多模块自动加载示意图

Fig. 4 Multi-module automatic loading diagram

群测控装置对存储和管理大容量数据的需求，依据存储容量、存取速度以及数据共享方面的硬件新技术的发展，通过研究大容量存储设备 SSD、eMMC 等物理介质组织方式、驱动器特性、数据存储方式及管理、数据访问接口，基于海量数据存储、损耗均衡及通用的数据管理方法即 FAT 文件系统，提出海量数据高效率的存储和数据访问的方案，提升了集群测控装置数据存储的性能。

3) 面向业务逻辑可视化设计

为了提升软件开发人员的设计水平，开发逻辑可视化设计工具，逻辑处理的标准元件经过全面测试验证积累成库。利用标准元件面向具体业务应用进行逻辑组态和数据配置，形成集群测控装置的功能设计文件。通过软件机器人对设计软件进行编译生成目标程序，再下载到装置形成测控功能的软件模块，面向业务可视化逻辑设计如图 5 所示。

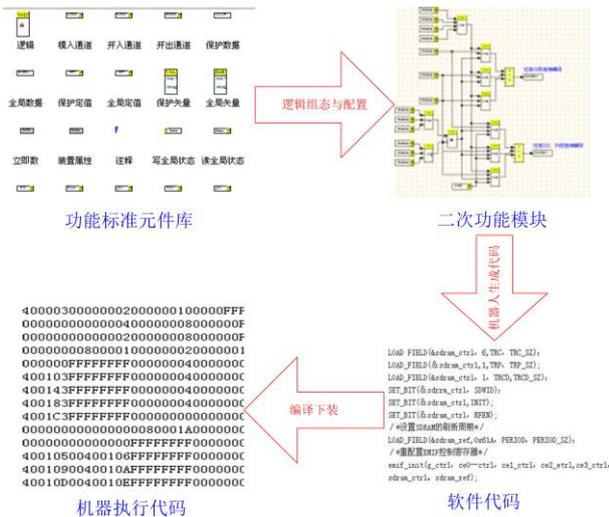


图 5 面向业务可视化逻辑设计

Fig. 5 Business-oriented visual logic design

4) 逻辑可视化仿真测试验证

通过定义标准的应用访问接口，实现了测控功能软件模块化设计的开放性，解决了面向不同业务应用进行软件功能设计的通用性。采用逻辑 PC 仿真技术，支持 Windows 环境下的仿真自动测试，逻辑业务开发脱离硬件环境，利用内部数据可视化技术和逻辑可视化技术，将嵌入式产品的源程序在 PC 上进行虚拟仿真，实现集群测控装置功能软件的仿真测试验证，提高设计质量和测试效率，为产品开发提供方便快捷的途径。

3 关键技术及实现方案

集群测控装置采用即插即用的思想，将实体测控功能进行虚拟化设计，间隔之间相互独立，并确保虚拟测控单元与实体测控装置的功能完全等价^[16-20]。当实体测控装置异常或故障时，投入集群测控装置中对应间隔的虚拟测控单元，解决了实体测控装置异常或故障时对应间隔测控功能失效的问题，实现智慧变电站测控功能的集中式后备。集群测控装置按电压等级进行集成，与实体间隔测控装置互为备用。

3.1 测控虚拟化技术

集群测控装置中每个虚拟测控单元以进程的形式运行，拥有各自独立的 ICD 模型、内存空间及 TCP/IP 链接。虚拟测控单元与实体测控装置使用相同的运行参数、联闭锁规则、ICD 模型及 CID 配置。集群测控装置上电初始化运行时，虚拟测控单元使用与间隔实体测控装置相同的 IP 地址、过程层 GOOSE 控制块的 APPID、组播地址等通信参数，因此客户端将与虚拟测控单元的通信视为原来的间隔实体测控装置。为了确保虚拟测控单元实时任务的及时响应，集群测控装置将任务进行了优先级分配。管理单元和虚拟测控单元多个进程间的通信采用共享内存的方式，直接将共享的内存页面映射到各自的虚拟地址空间中，多个进程直接访问同一个物理内存页面，减少了数据通信的中间环节，不同进程间的相互通信非常快捷。

集群测控装置对过程层网络数据采集集中处理的策略。过程层 SV、GOOSE 开入等多个间隔的测控原始数据经集中处理后分发到各个虚拟测控单元，各个虚拟测控单元的 GOOSE 开出数据经集中处理后发送到过程层网络。通过采取模块独立的策略，解决了过程层 SV 报文和 GOOSE 报文处理对于实时性的不同要求。集群测控装置设计了统一的过程层报文接收分发器，先统一处理所有的接收报文，然后再分发至各个虚拟测控单元；同时也设计

了统一的过程层报文发送集中器, 对虚拟测控单元发送的 GOOSE 报文进行集中处理。集群测控装置综合应用多端口流量控制、报文过滤、VLAN、GMRP 等网络技术, 提升过程层报文的接入和处理能力。

3.2 单网卡的多 IP 运行技术

集群测控装置同时运行多个虚拟测控单元, 每个虚拟测控单元使用和实体测控装置相同的 IP, 所以集群测控装置的单个网卡应能同时运行多个 IP。通过采用一个端口绑定多个 IP 地址, 实体测控装置故障时虚拟测控单元投入运行, 此时切换至集群测控装置的 IP 地址。集群测控装置可以通过 SNMP 协议关闭故障实体测控装置所连接的交换机端口, 将其从网络隔离, 解决了 IP 地址冲突的问题。

通过虚拟网卡解决了多 IP 同时运行的 MMS 通信问题。站控层 GOOSE 连线通过 1-A/1-B 端口, 对应装置 eth0/eth1 物理网卡, 虚拟网卡不需要注册组播地址, 可支持投/退。装置同时加载多个 CID 和 CCD 通信配置文件, 保证虚拟测控单元与对应间隔实体测控装置使用相同的配置文件。多个 CID 和 CCD 文件公用文件目录, 通过修改文件名增加 CPU 号进行区分。IEC 61850 通信库对多个 CID 进行虚拟合并, 生成一个大 SCD 文件进行统一处理。CCD 不进行合并处理, NPI 与 CPU 之间按照每个 CCD 文件独立通信交互。

3.3 互锁 GOOSE 通信交互

集群测控装置和实体测控装置交互的互锁信息通过站控层 GOOSE 收发。装置中各虚拟测控单元之间交互的互锁信息也通过站控层 GOOSE 收发, 装置网关采用 LOOPBACK 环回接口实现了互锁报文的“自发自收”。根据 CCD 文件名中的 CPU 号, 将接收的 GOOSE 互锁信息匹配后转发至相应的 CPU 模块。集群测控装置互锁 GOOSE 通信方式如图 6 所示。

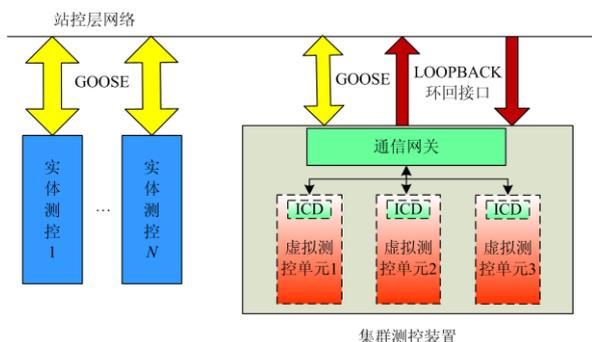


图 6 集群测控装置互锁 GOOSE 通信方式

Fig. 6 Interlocking GOOSE communication mode for cluster measurement and control devices

3.4 运行方式在线识别

采用基于状态识别的通信报文及功能逻辑自动投退方案, 虚拟测控单元未投入时, 仍正常接收过程层 GOOSE、SV 和站控层 GOOSE 信息并进行数据计算和逻辑判别, 实现备用数据和功能的实时监控。集群测控装置通过站控层和过程层 GOOSE 报文对实体测控装置的在线运行状态实时监控、在线感知, 实现虚拟测控单元和实体测控装置之间的“1 对 1”冗余备用。

集群测控装置按间隔自动判别。装置自检异常时, 自动熄灭运行灯, 虚拟测控单元变为“故障”状态。当实体测控装置“运行”在线, 集群测控自检正常时, 虚拟测控单元处于“热备”状态。虚拟测控单元处于“热备”状态时, 如果对应间隔的实体测控单元“故障”不在线, 按间隔自动将虚拟测控单元由“热备”状态切换为“运行”状态, 实现间隔测控功能的备用。间隔虚拟测控单元在“故障”或“热备”状态时, 其站控层和过程层网口通信功能关闭, 退出正常通信。

集群测控装置从 CCD 中提取实体测控装置的 GOOSE 发送组播地址, 注册网卡组播地址, 接收到该 GOOSE 后, 如果源 MAC 地址不在本装置, 则认为实体测控装置上线。集群测控装置实时检测过程层、站控层 GOOSE 报文的发送状态, 判别实体测控单元是否在线。集群测控接收到实体测控装置发送的过程层、站控层 GOOSE 报文后, 判别实体测控装置为“运行”状态, 否则延时 10 s 判别实体测控装置为“故障”状态。当实体测控装置在线运行时, 禁止集群测控装置中对应间隔的虚拟测控单元投入运行。只有实体测控装置站控层和过程层 GOOSE 报文发送状态均异常时, 才允许投入相应的虚拟测控单元。实体测控装置“运行”状态恢复时, 自动将集群测控装置中对应间隔虚拟测控单元的“运行”状态切换为“热备”状态, 由实体测控装置完成相应间隔的测控功能。

4 试验验证及工程应用

研制的集群测控装置已通过第三方检测机构的型式试验检测, 主要性能指标满足相关技术标准的要求, 集群测控装置关键技术指标如表 4 所示。集群测控装置已在某 110 kV 智慧变电站成功应用, 装置集成了多个间隔的测控功能, 作为实体测控功能的冗余后备, 集群测控装置工程应用示意图如图 7 所示。

表 4 集群测控装置关键技术指标

Table 4 Key technical indicators of cluster measurement and control device

检测项目	检测要求	检测结果
1. 对时性能	对时误差应小于 1 ms	<1 ms
2. 管理性能	装置应能同时运行的逻辑测控单元 不小于 15 个	15 个
	逻辑测控单元投入响应时间应不大于 120 s	42 s
3. 遥控性能	遥控数据响应时间不大于 1 s	<1 s
4. 遥信性能	遥信数据响应时间不大于 1 s	<1 s
	SOE 分辨率应不大于 1 ms	1 ms
5. 直流遥测量 输入基本误差	允许误差±0.20%	0.00%
6. 频率误差	输入频率在 45~55 Hz 时, 允许误差±0.005 Hz	0.000 Hz

智慧变电站采用“间隔测控+集群测控”的配置模式后,测控装置在功能和性能方面有了很大提升,

主要有以下几点:

1) 以往间隔测控装置故障或运行异常后,运维人员通常需要 3~5 h 赶到现场,消缺后才能让测控装置恢复正常运行,现在集群测控装置 1 min 内就能将虚拟测控单元切换为“运行”状态,实现间隔测控功能的自愈。

2) 由于变电站间隔测控装置之间存在联闭锁,间隔测控改扩建时通常需要修改全站的 SCD 文件,现在配置集群测控装置后,可以提前在集群测控装置中配置全站所有间隔测控的联闭锁功能,间隔测控改扩建时不再修改全站的 SCD 文件。

3) 以往测控装置故障或运行异常后,运维人员必须立即赶往现场处理,现在集群测控装置的间隔虚拟测控单元可实现间隔测控功能的自愈,运维人员可合理安排检修工作,不用立即去现场处理,减轻了检修人员的工作强度。

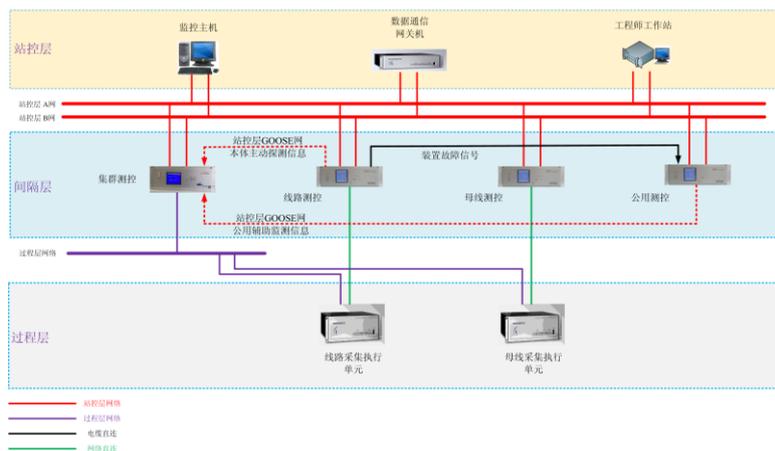


图 7 集群测控装置工程应用示意图

Fig. 7 Schematic diagram of engineering application of cluster measurement and control device

5 结论

本文研制的集群测控装置采用即插即用的思想,将实体测控功能进行虚拟化设计,每个间隔相互独立,并确保虚拟测控单元与实体测控装置的功能完全等价。当实体测控装置异常或故障时,自动投入集群测控装置中对应的虚拟测控单元,解决了实体测控装置异常或故障时对应间隔测控功能失效的问题,实现了智慧变电站测控功能的集中式后备。试验验证和工程应用表明,集群测控装置缩短了设备故障导致测控功能失效的时间,提升了智慧变电站自动化系统的可靠性。

参考文献

[1] 多功能测控装置技术规范: Q/GDW 1876—2013[S]. 2013.

Technical specifications for multi-functional measurement and control device: Q/GDW 1876—2013[S]. 2013.

[2] 樊陈, 倪益民, 窦仁晖, 等. 智能变电站一体化监控系统有关规范解读[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 1-5.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Interpretation of relevant specification of integrated supervision and control systems in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 1-5.

[3] 余高旺. 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 127-132.
YU Gaowang. Research and application of multifunctional measurement & control device of new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 127-132.

[4] 刘永钢, 熊慕文, 尹凯, 等. 智能变电站双测控方案优化设计[J]. 电气技术, 2016(1): 97-100.
LIU Yonggang, XIONG Muwen, YIN Kai, et al.

- Optimization of dual bay control unit configuration in smart substation[J]. *Electrical Engineering*, 2016(1): 97-100.
- [5] 文博, 蔡勇, 严守道, 等. 智能变电站集中式后备测控技术研究[J]. *湖北电力*, 2018, 42(1): 22-27.
WEN Bo, CAI Yong, YAN Shoudao, et al. Research on centralized backup measurement and control technology in smart substation[J]. *Hubei Electric Power*, 2018, 42(1): 22-27.
- [6] 王勇, 韩少晓, 尚力, 等. 智能变电站监控系统新型体系架构研究与实践[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 145-151.
WANG Yong, HAN Shaoxiao, SHANG Li, et al. Research and practice of novel architecture of supervision and control system in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 145-151.
- [7] SONG Qipeng, SHENG Wanxing, KOU Lingfeng, et al. Smart substation integration technology and its application in distribution power grid[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2016, 2(4): 31-36.
- [8] 车兵, 许家焰, 徐晓春, 等. 智能变电站二次检修安措防误技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 150-156.
CHE Bing, XU Jiayan, XU Xiaochun, et al. Research of secondary maintenance safety measures error proofing technology in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 150-156.
- [9] 李劲松, 陆鑫, 张金虎, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站数据隐私保护方法研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(7): 69-75.
LI Jinsong, LU Xin, ZHANG Jinhu, et al. Smart substation data privacy protection method based on IEC61850[J]. *Smart Power*, 2019, 47(7): 69-75.
- [10] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(4): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [11] 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]. Ed 2.0. 2010.
- [12] 任辉, 窦仁晖, 郑永康, 等. 一种模型驱动的测控装置优化研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 129-135.
REN Hui, DOU Renhui, ZHENG Yongkang, et al. Optimization research of model-driven measurement & control device[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 129-135.
- [13] 李澄, 袁宇波, 陆玉军, 等. 智能变电站分布式同步采样组网技术[J]. *电网技术*, 2014, 38(1): 47-52.
LI Cheng, YUAN Yubo, LU Yujun, et al. A networking transferring scheme of distributed synchronized sampled data for smart substation[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(1): 47-52.
- [14] 刘红军, 管萸, 朱玉锦, 等. 智能变电站间隔集群测控模式下的运维体系研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 159-165.
LIU Hongjun, GUAN Ti, ZHU Yujin, et al. Research on operation-maintenance system of cluster measurement and control device for bay level in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 159-165.
- [15] 李宝潭, 赵丹, 李宝伟, 等. 智能变电站在线防误系统关键技术的研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(6): 73-78, 111.
LI Baotan, ZHAO Dan, LI Baowei, et al. Key technologies of online error prevention system in smart substation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 73-78, 111.
- [16] 黄雄, 刘晓铭, 郝永奇, 等. 智能变电站新型通用保护测控平台研制[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(7): 66-69.
HUANG Xiong, LIU Xiaoming, HAO Yongqi, et al. Development of a new and universal protection and measurement-control platform for smart substation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(7): 66-69.
- [17] 梁云, 黄莉, 侯兴哲, 等. 配电网 CPS 的通信需求和网络资源分配方案探讨[J]. *中国电力*, 2019, 52(1): 32-39.
LIANG Yun, HUANG Li, HOU Xingzhe, et al. Discussion on communication requirement and network resource allocation scheme of cyber physical system for distribution network[J]. *Electric Power*, 2019, 52(1): 32-39.
- [18] REN Manman, HUANG Qing, HUANG Qi, et al. The design and implementation of visualized function correlation for secondary system in smart substation[C] // 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), October 20-23, 2015, Offenburg, Germany.
- [19] 周文海, 陈谦, 闪鑫, 等. 基于参数解耦的 FACTS 设备多目标优化配置[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(7): 1-9.
ZHOU Wenhai, CHEN Qian, SHAN Xin, et al. Multi-objective optimal placement of FACTS devices based on parameter decoupling[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(7): 1-9.
- [20] 赵长春, 邓茂军, 张艳超, 等. 智慧变电站集群测控功能冗余切换方案研究[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(9): 158-165.
ZHAO Changchun, DENG Maojun, ZHANG Yanchao, et al. Research on redundant switching scheme for cluster measurement and control functions in smart substation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(9): 158-165.

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-04-16

作者简介:

任志航(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统保护、自动化和仪表量测技术的研究工作; E-mail: 13703742226@139.com

邓茂军(1975—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事保护控制产品研发工作; E-mail: xjtc_dengmaojun@126.com

王磊(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统规划、电力系统二次及配电网供用电技术的研究工作。

(编辑 魏小丽)