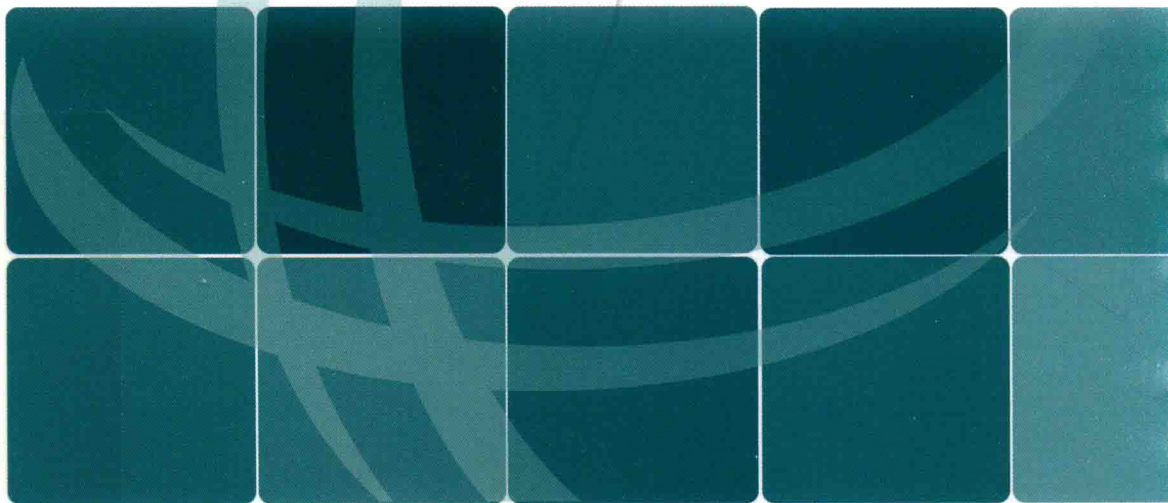


智能变电站采样 及控制技术

王 鹏 主 编
段 毅 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

智能变电站采样 及控制技术

主 编 王 鹏

副主编 段 毅

参 编 王志鹏 于宗波 屠 浩

党鑫强 李静云



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书分为综述、智能采样、智能控制、典型设计四部分，共十章，包括智能采样与智能控制概述，IEC 61850 标准，智能变电站网络采样架构及交换技术，智能采样设备技术要求，智能变电站智能采样关键技术，智能变电站网络采样关键测试，智能变电站网络采样的验收，网络控制设备技术要求，智能控制技术，智能变电站设计、工程配置及案例分析。本书全面分析了采样和控制原理、系统架构、设备原理和技术要求、工程实施等相关技术，以实际应用为例介绍了智能变电站的典型设计，使读者能充分了解和掌握智能变电站 IEC 61850 标准体系、原理、实现和应用。

本书理论与实际紧密结合，是智能变电站采样及控制技术人员设计、运行、维护的实用型参考书，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能变电站采样及控制技术 / 王鹏主编. —北京: 中国电力出版社, 2019.1
ISBN 978-7-5198-0569-2

I. ①智… II. ①王… III. ①智能系统—变电所—电力系统运行 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 022615 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 吴玉贤 (010-63412540)

责任校对: 黄 蓓 太兴华

装帧设计: 赵姗姗

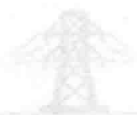
责任印制: 钱兴根

印 刷: 三河市百盛印装有限公司
版 次: 2019 年 1 月第一版
印 次: 2019 年 1 月北京第一次印刷
开 本: 710 毫米×1000 毫米 16 开本
印 张: 20
字 数: 372 千字
定 价: 68.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

前言 编委会



主任 潘兹勇

副主任 邢建华

委员 睢英莹 严文 马宇驰 付江

李维芳 李红雯 陈禄 刘志刚

姜伟滔 彭兴海 范广勤 袁海颖

张锋 常有菊 荣依群 王凯

余宁 郭煜

随着我国智能电网建设的不断深入,智能变电站已从数字化变电站逐步过渡到新一代智能变电站。智能变电站的建设和运行,对从事智能变电站设计、施工、运行等相关人员提出了新的要求。本书是作者多年从事智能变电站设计、施工、运行等工作的经验总结,也是从事智能变电站设计、施工、运行等工作的工程技术人员编写了该书。

本书共四部分。第一部分从智能变电站的组成、关键设备、基本术语和定义入手,介绍智能变电站的组成、关键设备、基本术语和定义。第二部分介绍智能变电站采样原理和技术要求、网络采样测试技术和验收要求。第三部分介绍智能变电站控制设备原理和技术要求,以及智能变电站顺序控制、电压无功综合控制和层次化保护等智能控制技术。第四部分介绍智能变电站的调试,并以实际智能变电站为例进行说明。

希望本书的出版能使变电二次技术人员对智能变电站采样和控制技术有一个全面深入的了解,熟悉各类采样设备和控制设备,了解其工作原理,从而为现场实践技术和技能,指导其实际工作。

智能变电站涉及多种先进技术,多学科知识交叉应用,受作者学识水平所限,书中疏漏欠妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2019年1月

目 录



前言

第一部分 综 述

第一章 智能采样与智能控制概述	2
第一节 变电站基础知识.....	2
第二节 智能变电站光纤通信技术.....	12
第三节 智能变电站采样技术.....	17
第四节 智能变电站控制技术综述.....	31
第二章 IEC 61850 标准	37
第一节 IEC 61850 实施规范.....	37
第二节 IEC 61850 协议实现.....	48
第三章 智能变电站网络采样架构及交换技术	85
第一节 采样相关规范介绍.....	85
第二节 网络采样结构.....	86
第三节 网络采样拓扑.....	94
第四节 网络采样交换技术.....	99

第二部分 智 能 采 样

第四章 智能采样设备技术要求	114
第一节 通用技术要求.....	114
第二节 电子式互感器.....	119
第三节 时钟同步系统.....	124
第四节 合并单元.....	139
第五节 过程层交换机.....	142

第六节	智能录波及网络通信记录分析一体化设备	149
第七节	智能变电站其他设备信息采集	160
第八节	智能变电站综合监控系统及功能子系统	163
第五章	智能变电站智能采样关键技术	177
第一节	授时系统与采样同步	177
第二节	网络延迟补偿与再采样技术	179
第三节	网络广播风暴	182
第六章	智能变电站网络采样关键测试	184
第一节	网络采样相关测试设备	184
第二节	网络性能测试	192
第三节	同步时钟系统测试	200
第四节	网络采样同步性测试	203
第七章	智能变电站网络采样的验收	208
第一节	出厂验收	208
第二节	现场验收	215

第三部分 智能控制

第八章	网络控制设备技术要求	218
第一节	智能高压设备	218
第二节	智能终端	229
第三节	测控装置	233
第九章	智能控制技术	238
第一节	顺序控制	238
第二节	智能防误操作	242
第三节	电压、无功综合控制	245
第四节	层次化保护	250

第四部分 典型设计

第十章	智能变电站设计、工程配置及案例分析	262
第一节	智能变电站设计规范	262

第二节	智能变电站典型设计	262
第三节	智能变电站工程配置	268
第四节	典型案例分析一——某 220kV 智能变电站建设方案	281
第五节	典型案例分析二——智能变电站运行维护案例	300
参考文献	305

第一部分 综述





第一章

本站为智能采煤变电所

智能采样与智能控制概述

第一节 变电站基础知识

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施，是输电和配电的集结点，变电站主要有升压变电站和降压变电站等。

变电站的一次设备主要有起变换电压作用的变压器、开闭电路的开关设备、汇集电流的母线、电压电流采样用的互感器等。变电站的主要设备和连接方式，按其功能不同而有差异。

变压器是变电站的主要设备，按其作用不同可分为升压变压器和降压变压器，前者用于电力系统送端变电站，后者用于受端变电站。为了在不同负荷情况下保持合格的电压，有时需要切换变压器的分接头，按分接头切换方式不同变压器有带负荷有载调压变压器和无负荷无载调压变压器。

开关设备包括断路器、隔离开关、负荷开关、高压熔断器等。断路器在电力系统正常运行情况下用来合上和断开电路，故障时在继电保护装置控制下自动把故障设备和线路断开，还可以有自动重合闸功能。隔离开关（刀闸）的主要作用是在设备或线路检修时隔离电压，以保证安全，它不能断开负荷电流和短路电流，应与断路器配合使用。在停电时应先拉断路器后拉隔离开关，送电时应先合隔离开关后合断路器。如果误操作将引起设备损坏和人身伤亡。负荷开关能在正常运行时断开负荷电流，但没有断开故障电流的能力，一般与高压熔断器配合用于10kV及以上电压且不经常操作的变压器或出线上。

变电站二次设备是指对一次设备进行监测、控制、调节、保护以及为运行、维护人员提供运行工况或生产指挥信号所需的低压电气设备，如测控装置、继电保护装置、监控系统、故障录波装置、远动装置、站内通信设备等。

电压互感器和电流互感器的工作原理和变压器相似，它们把高电压设备的运行电压、大电流即设备和母线的负荷或短路电流按规定比例变成测量仪表、继电保护及控制设备用的低电压和小电流。通常，在额定运行情况下，电压互感器二次电压为100V或 $100/\sqrt{3}$ V，电流互感器二次电流为5A或1A。

一、变电站的发展历程

变电站作为电网中的重要节点，随着系统的技术进步，已经发生了很大变



化。特别是自 20 世纪以来,随着电网及计算机技术、测量技术、通信技术、控制技术、智能化技术的发展,变电站自动化系统逐渐步入数字化时代,并在提高稳定性、增强可靠性、信息共享、简化架构、提升功能、降低造价等方面取得了重大突破和显著的社会经济效益。变电站的发展可以分为四个阶段。

1. 传统变电站

20 世纪 80 年代及以前,变电站继电保护和自动化装置采用晶体管型或电磁型设备,其电气结构复杂、自动化程度低、设备无自检能力,变电站安全可靠性能差,且供电质量无法保证。

2. 综合自动化变电站

20 世纪 90 年代,随着微机保护技术的广泛应用,以及计算机、网络、通信技术的发展,变电站综合自动化系统成功应用,实现对变电站设备运行监视、测量、控制和协调的功能。综合自动化系统先后经历了集中式、分散式、分散分层式等不同结构的发展,使得变电站设计更合理,运行更可靠,更利于变电站无人值班的管理。但综合自动化变电站也存在以下不足:

(1) 装置功能相对独立,缺乏系统级的智能应用。虽然测控、保护等装置实现了数字化,但缺乏真正意义上的变电站系统智能,装置间缺乏整体协调、集成应用和功能优化;状态估计、故障分析、决策支持等高级应用功能尚未完全实现。

(2) 二次回路接线复杂。由于未实现采样、控制的数字化,仍采用二次接线传输电压、电流和控制信息,导致二次接线十分复杂。此外,变电站内使用的通信规约不统一,加大了调试复杂性,也增加了运行、维护的难度,给设计、调试和维护带来了一定的困难,降低了系统的可靠性。

(3) 缺乏统一的信息模型。相互独立的自动化装置间缺乏互操作性,一方面局限了其在站内的应用,另一方面也给集控中心对信息的集成和维护带来困难。

3. 数字化变电站

21 世纪初,随着数字化技术的不断进步和 IEC 61850 标准在国内的推广应用,国内出现了基于 IEC 61850 标准的数字化变电站。数字化变电站具有全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、高级应用互动化四个重要特征。数字化变电站体现在过程层设备的数字化,整个变电站内信息传输的网络化,以及断路器等高压设备的智能化,设备检修工作逐步由定期检修过渡到以状态检修为主的管理模式。

4. 智能变电站

智能变电站是一个不断发展的概念,一座完全意义的智能化变电站是采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备,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要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能，实现与相邻变电站、电网调度等互动的变电站。

智能变电站的智能化主要体现在两个方面，即智能设备和智能高级应用。智能设备是指一次设备和智能组件的有机结合，智能组件是二次设备的统称，包括测控装置、保护装置、状态监测装置、智能终端等，也可以是几个装置的集合，如 GIS 汇控柜、屏柜等。智能组件作为一次设备的“管家”，帮助一次设备做好传输和分配电能的工作，还具有测量、控制、保护、计量等功能。智能高级应用是指智能变电站采集的全景数据，通过站内信息一体化平台以及变电站自动化系统高级应用模块，对数据进行初步的挖掘、分析，实现智能告警、顺序控制、设备状态可视化、事故综合分析决策等。比如，通过对变压器在线监测数据进行分析可发现设备存在的隐患，并发出预警。

智能变电站强调全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化。此外，还具有功能集成化、结构紧凑化、状态可视化等显著技术特征，易扩展、易升级、易改造、易维护，被认为是变电站发展历史上的一次革命。

5. 新一代智能变电站

2012年初，国家电网公司启动新一代智能变电站研究工作，提出以“系统高度集成、结构布局合理、装备先进适用、经济节能环保、支撑调控一体”为目标，以功能需求为导向，主动引导设备研制，构建以集成化智能设备、一体化业务系统和站内统一信息流为特征的新一代智能变电站。

(1) 系统高度集成。新一代智能变电站通过整合系统功能、优化结构布局、以“一体化设备、一体化网络、一体化系统”为技术构架，有效提升变电站优化集成设计水平。“高度集成”的设计理念包括一次与二次设备高度集成、IED 装置高度集成、网络高度集成、站域平台高度集成及设备空间高度集成五个方面。

(2) 结构布局合理。在保证电网具备足够安全性的条件下，对变电站的主接线进行优化，适当降低互感器数量，对一次设备进行合理的位置安排，节约变电站设备及基建的费用，将一次设备与传感器进行整体化设计。在电子互感器稳定成熟后，可以集成于一次设备当中，从而进一步增加设备的集成度，实现空间的有效利用。将有关二次设备放在一次设备的附近进行就地摆放和安装，与此同时，采取新型安装机械设备及检修装置，便于恶劣气候条件检修及维护，减少二次设备屏柜的数量，从而节省建筑面积。

(3) 装备先进适用。新一代智能变电站采用智能化一次设备，集成化二次



系统,改进现有设备,研制新型设备,技术指标先进、性能稳定、全寿命周期长,变电站设计、调试技术取得突破,设计、配置、调试工具方便高效。采用基于图形用户界面的设计、配置成套工具,二次虚端子接线设计文件与变电站配置文件无缝接口 CAD 图形文件与 SCD 模型文件可同步转换,并具备图形连接与模型中虚端子自动匹配和校核功能,使变电站设计、安装、调试效率大大提高。

(4) 经济节能环保。新一代智能变电站使用的 IED 减少 30%以上,占地减少 40%~50%,建筑面积减少 60%以上,现场安装工作量减少 60%以上,有效体现智能变电站集成化、模块化、一体化、标准化和工业化的发展理念。

(5) 支撑调控一体。优化设备告警信息直传、变电站全景远程浏览等功能,简化一体化监控系统配置,深化一键式顺序控制应用,同时提升高级功能应用水平,满足无人值守及“大运行”管理模式需求。

二、智能变电站与传统变电站的区别

根据实现功能,智能变电站划为过程层、间隔层、站控层三层结构;按照通信报文传输格式,智能变电站网络分为过程层网络和站控层网络两层。传统变电站与智能变电站结构对比如图 1-1 所示。

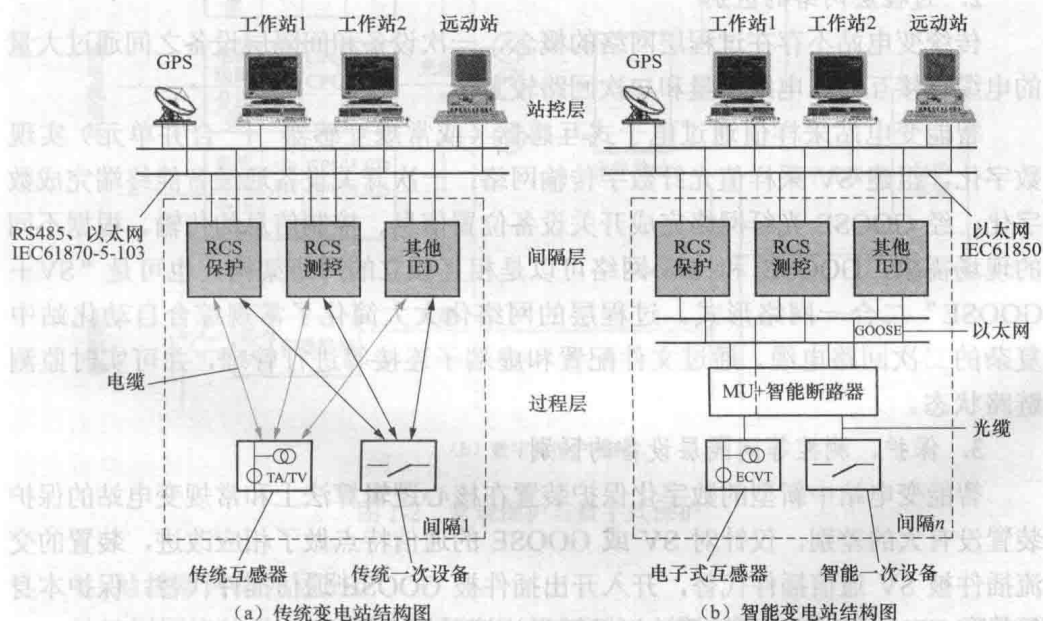


图 1-1 传统变电站与智能变电站结构

1. 过程层设备的区别

(1) 传统变电站采用常规互感器采集电网电压、电流,而智能变电站可采用

电子式互感器对电压、电流进行采样。两者的区别见表 1-1。

表 1-1 常规互感器与电子式互感器比较

比较项	常规互感器	电子式互感器
绝缘	复杂	绝缘简单
体积及质量	大、重	小、轻
TA 动态范围	范围窄、有磁饱和	范围宽、无磁饱和
PT 谐振	易产生铁磁谐振	无谐振现象
TA 二次输出	不能开路	可以开路
输出形式	模拟量输出	数字量输出

注 电子式互感器特别是光学互感器是近年来发展起来的新设备，其长期运行可靠性、温度稳定性问题需要长时间检验，确保运行安全。目前智能变电站也可采用“常规互感器+合并单元”来实现采样数字化。

(2) 传统变电站用传统开关设备，和间隔层设备用电缆直接连接；智能变电站采用“传统开关设备+智能终端”就地完成开关数字化，将位置信息和控制信息转化为 GOOSE 数字信号通过光纤和间隔层设备交互。

2. 过程层网络的区别

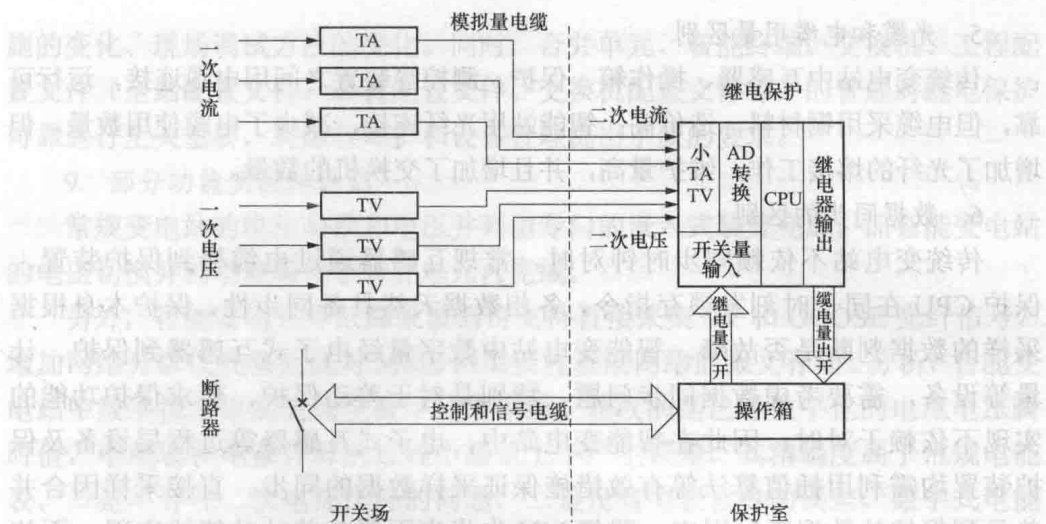
传统变电站不存在过程层网络的概念，一次设备和间隔层设备之间通过大量的电缆直接互连，电缆用量和二次回路较复杂。

智能变电站采样值通过电子式互感器（或常规互感器 + 合并单元）实现数字化，组建 SV 采样值光纤数字传输网络；一次开关设备通过智能终端完成数字化，经 GOOSE 光纤网络完成开关设备位置信息、控制信息的传输。根据不同的现场需求，GOOSE 和 SV 网络可以是相互独立的网络架构，也可能是“SV+GOOSE”二合一网络形式。过程层的网络化大大简化了常规综合自动化站中复杂的二次回路电缆，通过文件配置和虚端子连接等进行管理，并可实时监测链路状态。

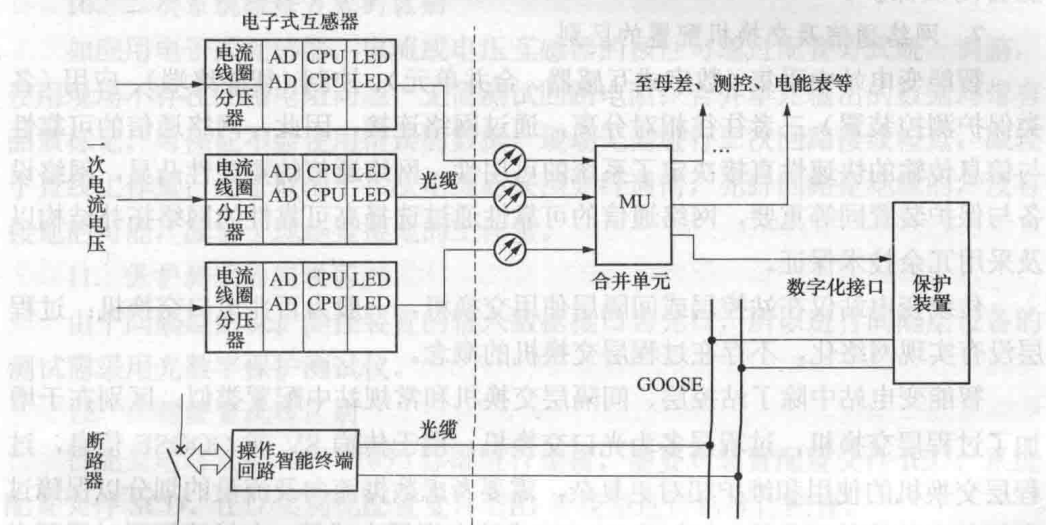
3. 保护、测控等间隔层设备的区别

智能变电站中新型的数字化保护装置在核心逻辑算法上和常规变电站的保护装置没有大的差别，仅针对 SV 或 GOOSE 的通信特点做了相应改进，装置的交流插件被 SV 通信插件代替，开入开出插件被 GOOSE 通信插件代替，保护本身仅保留 CPU 插件完成保护算法以及键盘、液晶等人机界面。

保护、测控等间隔层设备均支持光纤通信接口，数据基于统一标准建模，各 IED 设备间的信息共享和互操作性均优于常规变电站，间隔层设备对上接口符合 IEC 61850 MMS 规范要求。常规保护与数字式保护如图 1-2 所示。



(a) 常规保护示意



(b) 数字式保护示意

图 1-2 常规保护与数字式保护

4. 站控层网络的区别

站控层网络的最大变化在于通信规约的变化，传统变电站的网络 103 规约因各设备厂家理解区别较大，设备间的信息交互能力差，不利于信息共享。在智能站中均按照统一规范进行数据建模，体现出智能站信息共享能力和互操作性能好的优势。

5. 光缆和电缆用量区别

传统变电站中互感器、操作箱、保护、测控等装置之间用电缆连接，运行可靠，但电缆采用铜材料，造价高；智能站用光纤连接，减少了电缆使用数量，但增加了光纤的熔接工作，维护量高，并且增加了交换机的数量。

6. 数据同步的区别

传统变电站不依赖同步时钟对时，常规互感器通过电缆接到保护装置，保护 CPU 在同一时刻发锁存指令，各相数据天然具备同步性，保护本身根据采样的数据判断是否故障。智能变电站中数字量经电子式互感器到保护、计量等设备，需要考虑数据同步问题，特别是对于差动保护，要求保护功能的实现不依赖于对时。因此在智能变电站中，电子式互感器等过程层设备及保护装置均需利用插值算法等有效措施保证采样数据的同步。直接采样因合并单元到保护的数据延时固定，即便 MU 失步也不影响差动功能的实现，不依赖于对时系统，而网络采样的方式必须保证时钟系统的可靠性，若失步有可能会闭锁保护。

7. 网络通信及交换机配置的区别

智能变电站中采集（数字式互感器、合并单元）、控制（智能终端）、应用（各类保护测控装置）三者往往相对分离，通过网络连接，因此，网络通信的可靠性与信息传输的快速性直接决定了系统的可用性，网络通信的重要性凸显，网络设备与保护装置同等重要，网络通信的可靠性通过选择高可靠性的网络拓扑结构以及采用冗余技术保证。

传统变电站仅在站控层或间隔层使用交换机，一般为百兆电口交换机；过程层没有实现网络化，不存在过程层交换机的概念。

智能变电站中除了站控层、间隔层交换机和常规站中配置类似，区别在于增加了过程层交换机，过程层多为光口交换机，用于传输 SV 或 GOOSE 信息，过程层交换机的使用和维护相对更复杂，需要考虑数据流向及流量的划分以保障过程层信息传输的可靠性，如划分 VLAN 或动态组播方式等，在扩建间隔时需要考虑对过程层交换机配置的相应更改。尤其在网采网跳时，过程层交换机的重要性应和保护设备同级。

8. 回路设计、运行维护、试验检测和设备管理的变革

智能变电站取消了大部分的电缆连接，取而代之的是设备之间的信号软连接，这些连接信息以及变电站设备模型都保存在变电站配置文件中，带来了变电站的建设、技改、扩建二次回路设计方式的重大变革。

由于信号采用网络传输方式，现有的运行操作、检修、试验均发生很大的变化，如软压板取代硬压板带来运行操作的变化；设备检修、故障消缺带来安全措



施的变化、现场调试方法的变化。同时，合并单元、智能终端、交换机、工程配置文件（全站配置文件、装置配置文件、交换机配置文件等）的管理对继电保护可靠运行至关重要，对运行维护和设备管理提出了新的要求。

9. 部分功能实现的区别

常规变电站的电压切换和电压并列由专门的嵌入式装置完成，而智能变电站的电压切换并列功能集成于合并单元内完成。

另外，智能变电站中故障录波器可支持直接采集 SV 和 GOOSE 光纤信号，增加网络分析仪设备完成对 MMS 网络及过程层网络的报文存储、分析，智能变电站中数字接口电能表为全数字处理系统，获取的是已经数字化的电流电压瞬时值，电能表在电量计算的过程中理论上不产生误差，其精确度高于常规电能表，一是不存在二次电缆压降的问题，二是没有电表自身的误差。数字式电能表通过 RS485 接口，标准规约（DL645）和电能表处理器通信，对处理器没有特殊要求。

10. 二次系统检修方式的区别

如应用电子式互感器，电流或电压互感器的极性可通过配置方式统一调整，使用现场不存在回路电阻问题，无需测试回路电阻；合并单元输出的数据均带有品质标记，可保证不会使用错误的数 据，现场无需进行二次回路接线检查，减轻了查线工作量；由于取消了二次电缆而采用光纤通信，光纤回路是绝缘的，没有接地的可能，减轻了现场查接地的工作量。

11. 保护测试的实现区别

由于间隔层的保护测控装置的输入数据接口为光口，所以进行间隔层设备的测试需采用光数字保护测试仪。

12. 工程配置流程区别

智能变电站采用 IEC 61850 标准进行建模，需要对装置配置文件 ICD、系统配置文件 SCD、IED 实例化配置文件 CID 等模型进行标准化配置。

13. 改扩建工程区别

传统变电站扩建增加新的间隔即可，相对简单；智能变电站要扩建增加新的间隔，就必须将原来全站 的 IED 能力描述文件 ICD 文件、SSD 系统规格文件及全站系统配置 SCD 文件重新进行定义。

三、智能变电站关键设备及技术

1. 电子式互感器

电子式互感器在智能变电站试点工程中得到广泛应用。作为智能变电站的重要设备，电子互感器在采集数字化、控制网络化、设备紧凑化、状态可视化、检修状态化等方面发挥了重要的作用，但因电子式互感器的研发、制造、应用仍处