

概 述

全球能源资源主要有煤炭、石油、天然气等化石能源和水能、风能、太阳能、海洋能等清洁能源。在能源和电力需求增长的驱动下,构建以输送清洁能源为主导的全球能源互联网,是实现未来世界可持续发展的必由之路。

太阳能是人类最基本的能源,具有可再生、分布广、无污染等特性。作为太阳能资源利用的主要途径之一,光伏发电正逐渐成为世界可再生能源发展的重要方向。然而,光伏电站只在白天发电,且受天气因素影响大,波动性、随机性、间歇性强,大规模光伏电站接入电网后会对电力系统的安全稳定运行带来不利影响。为确保电网的安全稳定运行和光伏发电的有序消纳,必须借助先进的自动化技术降低光伏并网带来的各种影响。

本章简要介绍了太阳能资源分布情况和光伏发电现状,以及自动化技术在光伏电站中的作用。

第一节 太阳能资源分布

太阳能来自太阳辐射,是世界上资源量最大、分布最为广泛的清洁能源。太阳能发电是太阳能开发利用的最主要方式。从能量角度来看,太阳一年辐射到地球表面的能量约 116 万亿 t 标准煤,相当于 2014 年世界一次能源消费总量(183.6 亿 t 标准煤)的 6300 倍,太阳能发电将成为世界可再生能源发展的重要方向。

一、全球太阳能资源分布

根据世界能源理事会(World Energy Council, WEC)估算,全球清洁能源资源每年的理论可开发量超过 150000 万亿 kWh,按照发电煤耗 300g 标准煤/kWh 计算,约合 45 万亿 t 标准煤,相当于全球化石能源剩余探明可采储量的 38 倍。

太阳能资源主要分布在东非、北非、中东、澳大利亚、中国西部、美国西南部、智利等辐照强度高、地广人稀、荒漠面积广阔的地区。这些地区大多远离人类的生产生活中心数百到数千千米,适宜建设大型集中式太阳能发电基地,通过特高压、超高压输电通道集中输送到负荷中心。在人口和建筑物稠密的城市和乡村,适合因地制宜地发展分布式光伏发电,通过接入本地电网,满足部分当地用电负荷需求。

世界太阳能资源分布情况见表 1-1。

表 1-1

世界太阳能资源分布情况

地区	理论蕴藏量(万亿 kWh/a)	占比(%)
亚洲	37500	25
欧洲	3000	2

续表

地区	理论蕴藏量 (万亿 kWh/a)	占比 (%)
北美洲	16500	11
南美洲	10500	7
非洲	60000	40
大洋洲	22500	15
合计	150000	100

注 本表数据来源于世界能源理事会, World Energy Resources: 2013 survey; 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), the IPCC Special Report: Renewable Energy Resources and Climate Change Mitigation (SRREN), 2011 年 5 月。

二、我国太阳能资源分布

我国太阳能资源非常丰富, 理论储量达每年 17000 亿 t 标准煤。太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。大多数地区年平均日辐射量在 $4\text{kWh}/\text{m}^2$ 以上, 西藏日辐射量最高达 $7\text{kWh}/\text{m}^2$, 年日照时数大于 2000h。与同纬度的其他国家相比, 与美国相近, 比欧洲、日本优越得多, 因而有巨大的开发潜能。

我国受气候、地理等环境条件的影响, 我国太阳辐射资源分布具有明显的地域性。根据测得陆地水平面太阳能年辐射总量的大小, 我国可划分成资源丰富区、资源较丰富区、资源较贫乏区和资源贫乏区四个太阳辐射资源带。

第二节 光伏发电现状与趋势

太阳能发电主要有光伏发电和光热发电两种形式。光伏发电是根据光生伏特效应原理, 利用太阳能光伏电池, 将太阳光能直接转化为电能。光热发电是指利用大规模阵列抛物或碟形镜面收集太阳热能, 通过换热装置提供蒸汽, 再推动汽轮发电机发电。随着太阳能发电技术和全球能源互联网的发展, 太阳能发电将成为未来潜力最大、增长最快的能源。按照清洁能源加快发展的情景预测, 预计到 2050 年前后, 太阳能发电量将超过 26 万亿 kWh, 占全球总发电量的比重达到 36% 左右。

一、光伏发电现状

自 20 世纪 70 年代开始的一段相当长时期内, 光伏发电主要是在无电地区离网应用, 为解决偏远地区农牧民的基本生活发挥了极为重要的作用, 同时也为航标灯、微波通信中继站、铁路信号等提供了安全可靠的电源。离网光伏系统应用规模和领域的扩大, 为解决工业、农业特殊用电需要做出了贡献。

美国在 1997 年提出“百万屋顶计划”, 是最早制定光伏发电发展规划的国家。日本 1992 年启动了“新阳光计划”, 在 2003 年日本光伏组件生产占世界的 50%。德国的新可再生能源法规定了光伏发电上网电价, 大大推动了光伏市场和产业发展, 使德国成为继日本之后世界光伏发电发展最快的国家。瑞士、法国、意大利、西班牙、芬兰等国家, 也纷纷制订光伏发展计划, 并投巨资进行技术开发和加速工业化进程。

二、我国光伏发电现状及发展趋势

中国光伏发电产业于 20 世纪 70 年代起步, 90 年代中期进入稳步发展时期。太阳电池及组件产量逐年稳步增加。经过 30 多年的努力, 已迎来了快速发展的新阶段。在“光明工

程”先导项目和“送电到乡”工程等国家项目及世界光伏市场的有力拉动下，我国光伏发电产业迅猛发展。根据《太阳能利用十三五发展规划》，到2020年年底，太阳能发电装机容量达到1.6亿kW，年发电量达到1700亿kWh，年度总投资额约2000亿元。其中，光伏发电总装机容量达到1.5亿kW，分布式光伏发电规模显著扩大，形成西北部大型集中式电站和中东部分布式光伏发电系统并举的发展格局。

第三节 光伏电站自动化技术

电力系统自动化包括生产过程的自动检测、调节和控制，系统和元件的自动安全保护，网络信息的自动传输，系统生产的自动调度，以及企业的自动化经济管理等。电力系统自动化的主要目标是保证供电的电能质量（频率和电压），保证系统运行的安全可靠，提高经济效益和管理效能。我国大部分光伏电站建在太阳能资源比较丰富的地区，这类地区电网结构较薄弱，地区负荷小，而单个并网点光伏发电接入容量很大，给光伏发电并网运行带来很大挑战。借助自动化技术，可以有效降低光伏发电功率随机性对电网带来的不利影响，提高电力系统运行的安全性和稳定性。

一、电力系统自动化技术的发展与应用

（一）电力系统自动化技术的发展

20世纪50年代以前，电力系统容量在几百万千瓦左右，单机容量不超过10万kW，电力系统自动化多限于单项自动装置，且以安全保护和过程自动调节为主。例如电网和发电机的各种继电保护、汽轮机的危急保安器、锅炉的安全阀、汽轮机转速和发电机电压的自动调节、并网的自动同期装置等。20世纪50~60年代，电力系统规模发展到上千万千瓦，单机容量超过20万kW，并形成区域联网，在系统稳定、经济调度和综合自动化方面提出了新的要求。厂内自动化方面开始采用机、炉、电单元式集中控制。系统开始装设模拟式调频装置和以离线计算为基础的经济功率分配装置，并广泛采用远动通信技术。各种新型自动装置如晶体管保护装置、可控硅励磁调节器、电气液压式调速器等得到推广使用。20世纪70~80年代，以计算机为主体配有功能齐全的整套软硬件的电网实时监控（SCADA）开始出现。20万kW以上大型火力发电机组开始采用实时安全监控和闭环自动起停全过程控制。水力发电站的水库调度、大坝监测和电厂综合自动化的计算机监控开始得到推广，各种自动调节装置和继电保护装置中广泛采用微型计算机。21世纪初，风电、光伏蓬勃发展，为有效应对风电、光伏规模化发展对电网运行带来的不利影响，新能源功率预测、功率控制技术得到电网企业和发电企业的高度重视，其产品应用在实践中也取得良好效果。

（二）电力系统自动化技术在光伏电站中的应用

与常规电源不同，光伏电站的输出功率具有波动性和间歇性的特点，光伏电站将所发的电能像常规发电站一样，全部输入电网，使得电网结构越来越复杂。为此，光伏电站必须通过光伏电站自动化系统与电网调度自动化系统有效衔接，实现光伏电站实时监测、功率控制、自动电压控制、安全稳定控制及信息申报等站端信息的上传、下发，满足安全并网运行要求，实现最优调度。

把光伏发电功率纳入电网的调度计划和实时运行调控，是保证大规模光伏接入、电网稳定经济运行的重要措施。同时，将光伏电站的运行状态和环境参数纳入到调度端光伏电站实

时监测模块中，实现光伏电站监测、预测与控制功能的有机结合，有助于合理安排常规机组发电计划，解决电网调峰调频问题，提高电网新能源消纳能力，从而为电网大规模光伏电站并网的安全性和经济性提供有力的技术保障。

二、光伏电站自动化技术概述

(一) 光伏电站自动化技术架构

光伏电站自动化技术是监视、控制光伏发电过程的业务系统和智能设备的技术总称。它由多个子系统组成，每个子系统完成一项或几项功能，主要由光伏电站计算机监控系统、光功率预测系统、功率控制系统、同步相量测量装置、电能量采集装置及支撑业务系统通信的网络和安全防护设备等子系统组成，光伏电站自动化系统典型结构及数据通信方式如图 1-1 所示。

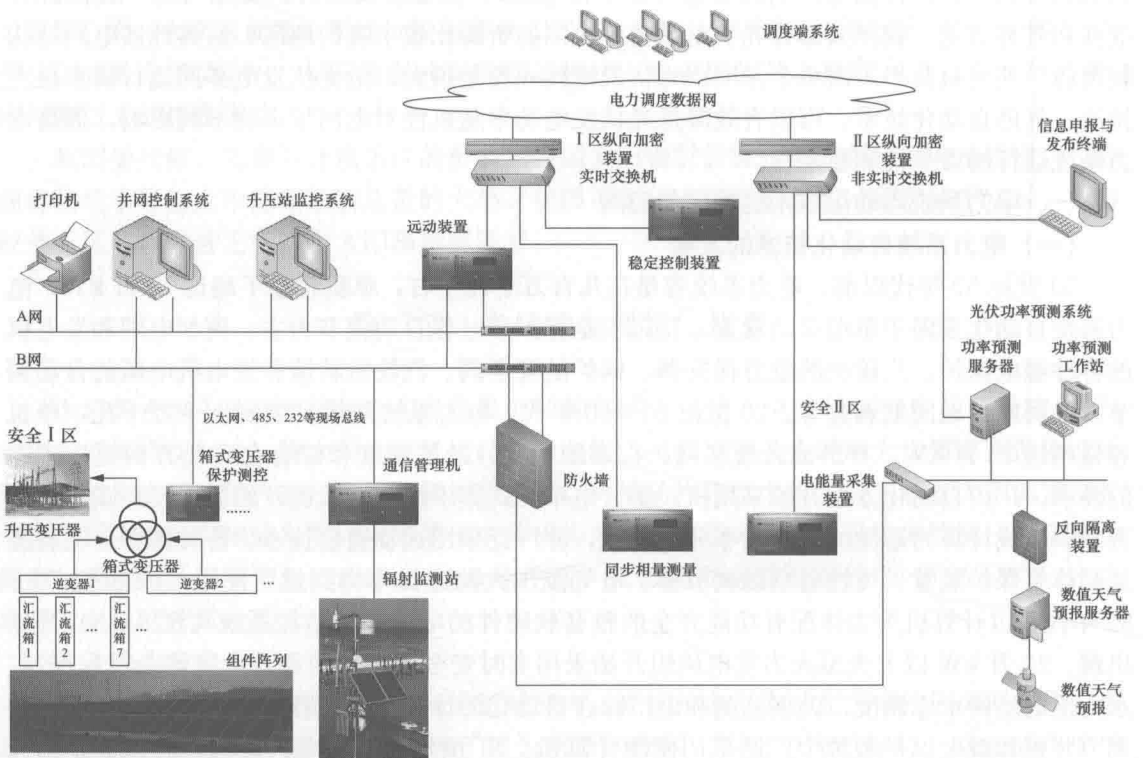


图 1-1 光伏电站自动化系统典型结构及数据通信方式

光伏电站计算机监控系统、功率控制系统、功率预测系统等子系统采用以太网组网的方式进行通信。光伏电站计算机监控系统实现电站逆变器、无功补偿等设备有功、无功值及断路器、开关位置状态等主要信息的自动采集、监视和数据处理；功率预测系统接收监控系统传送的有功值、实时气象采集装置传送的辐照度、温度等气象信息及数值天气预报传送的天气预报信息实现电站短期、超短期功率预测，为光伏电站合理安排检修计划提供辅助分析决策手段；同步相量测量装置采集母线、主变压器、线路的电压、电流和开关量信号，为电网运行动态监视与分析应用提供动态信息来源。为保障电力二次系统信息传输安全，光伏电站通过电力调度数据网将上述必要信息上传至调度主站，实现与各级调度机构实时生产数据的

传输和交换，满足电网安全运行需要。

(二) 光伏电站自动化系统功能概述

光伏电站现场自动化系统涉及子系统多，运行工况复杂。与光伏电站生产及日常运行密切相关的主要有计算机监控系统、功率预测系统、并网控制系统、相量测量装置及二次系统安全防护设备等。

1. 计算机监控系统

(1) 系统概述。

计算机监控系统主要实现光伏电站发电过程主要信号的自动采集、监视和数据处理，同时实现调度运行信息的自动上传，满足电网调度运行需要，是调度运行人员对现场电力生产过程最直接、最重要的监视工具。计算机监控系统通常采用分层分布式结构，由间隔层和站控层两部分组成。站控层设备包括各类面向全站管理的服务器、操作员站、远动通信装置及其他接口设备等；间隔层设备包括光伏逆变器、汇流箱、太阳跟踪系统、气象监测系统及辅助系统的通信控制单元，光伏发电单元规约转换器，保护和测控装置等设备。光伏电站升压站采用智能变电站设计的，监控系统由站控层、间隔层、过程层设备组成，过程层设备包括合并单元、智能终端、智能组件等。

(2) 系统组成及功能。

光伏电站计算机监控系统按其功能由数据采集，规约转换数据处理，信息的发送、接收和执行，人机联系和时钟同步子系统 5 个子系统组成。

1) 数据采集。数据可分为开关量和测量量两大类。开关量包括断路器和隔离开关位置、自动装置和继电保护的工作状态等。电网运行状态信息主要通过保护测控装置采集，信息源为一次设备辅助触点、保护测控装置及自动装置自身的工作状态及信号。电网运行量测数据通过保护测控装置采集，信息源为互感器；光伏区升压站内大部分自动装置和继电保护的运行状态信息可基于 IEC60870-5-103 或 IEC61850 等协议直接接入到站内监控网络，部分不能支持这些通信协议的自动装置基于通信管理机的规约转换接入。

光伏发电单元数据采集通常采用保护测控通信一体化装置，支持箱式变压器保护测控、支持规约转换、光纤环网通信接口等功能，实现发电单元内箱式变压器、逆变器、汇流箱的统一通信接入以及信息上传，支持对各逆变器的控制。

2) 规约转换数据处理。对于采集到的数据，通常根据不同要求，加以适当的处理，如数字滤波、乘系数、越限判别、测量量越阈值检测、开关量变位检测等。

3) 信息的发送、接收和执行。光伏电站端和调度端之间采用远动通信规约进行数据传输。光伏电站端接收的主要是调度端下达的遥控、遥调命令，执行结果分别由遥信和遥测反馈给调度端。

4) 人机联系。人机联系是监控系统的重要组成部分，采用可视化技术，实现电网运行信息、气象数据、保护信息、一、二次设备运行状态等信息的运行监视和综合展示，并接受工作人员操作命令。

5) 时钟同步子系统。光伏电站站内配置统一的同步时钟设备，对站控层各工作站及间隔层各测控单元等有关设备的时钟进行校正。一般情况下，站控层设备采用 NTP/SNTP 网络对时，间隔层、过程层设备通常采用直流 IRIG-B 码对时。

2. 相量测量装置

(1) 装置概述。

电力系统运行状态为各母线电压向量（幅值和相角），由网络元件参数、表征网络拓扑连接特性的开关状态和边界条件（发电和负荷水平）决定。要实现电力系统有效广域实时监控，就要建立一套完备的量测系统，以达到系统完全可观测。基于时间同步技术的同步相量测量单元能够以高精度直接测量测点的电压幅值和相角，为调度端电网运行动态监视与分析应用提供动态信息来源。

(2) 装置组成及功能。

同步相量测量装置包括数据集中器和相量采集单元。相量采集单元可分布安装于各个继电保护小室或就地箱式变电站，用于采集母线、主变压器、线路的电压、电流和开关量信号，数据集中器对多台采集单元输出的同步相量信息进行汇集上送和本地存储，满足电网对光伏电站并网要求，光伏电站相量测量系统组成如图 1-2 所示。

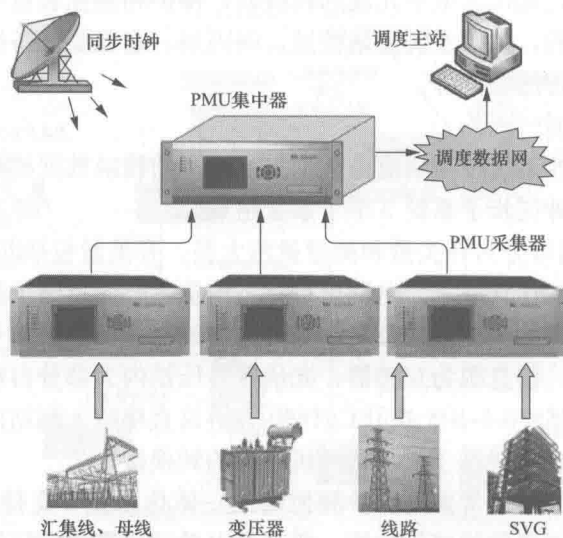


图 1-2 光伏电站相量测量系统组成

通过同步相量测量系统，可实现所接电器元件的三相电压、三相电流、有功/无功功率、系统频率、开关状态、GPS 同步状态实时数据记录及暂态数据的离线分析、谐波分析。

装置与主站之间采用电力调度数据网通信方式，按主站的功能要求提供相关的实时数据、录波数据等，并且与多个主站（省调、分调、国调）通信时互不影响。

3. 功率预测系统

(1) 系统概述。

光伏发电功率预测技术是指研究分析光伏电站发电功率的影响因素及其变化规律，同时根据现有气象条件和光伏电站运行状态，采用适当的数学预测模型预测未来一定时段光伏电站功率的方法。

光伏电站功率预测系统是基于上述方法，借助计算机手段开发的功率预测技术支持系统。其能为光伏电站合理安排检修计划提供辅助分析决策手段，进而提高光伏发电利用时间和发电量，有助于电网调度机构及时制定科学的日运行方式，调整和优化常规电源的发电计

划,提高电网的安全性和稳定性,同时降低因光伏发电并网而额外增加的旋转备用容量,改善电网运行的经济性。

(2) 系统结构及功能。

光伏电站功率预测系统主要由实时气象采集系统、功率预测计算系统组成。

1) 实时气象采集系统。实时气象采集系统实现对光伏电站现场实时辐照值、风速、风向、温度、湿度、气压等气象要素的采集,并将实时采集的数据传输至功率预测计算子系统,作为功率预测的重要数据来源,硬件设备主要包括辐照仪、风速风向仪、温湿度传感器、数据采集通信设备等。一座光伏电站根据其覆盖面积及地形地貌特征可以设置一座或者多座气象采集器。气象采集器的设置要能准确反映整个光伏电站区的辐照强度等气象条件,满足光功率预测系统功能。气象采集信息是电站功率预测的重要数据源。

2) 功率预测计算系统。功率预测计算系统包括数值天气预报子系统和功率预测应用子系统。数值天气预报子系统主要提供多日气象预测信息如辐照量、气温、日照时间等数据,并对其内部的天气预报数据进行进一步降尺度细化处理,更好地提高数值天气预报的精度。数值天气预报数据是进行功率预测的重要数据源。功率预测应用子系统用于接收实时气象和电站功率数据,依据系统预测模型,预测短期和超短期功率预测结果,并将数据上传至调度。

4. 并网控制系统

(1) 系统概述。

光伏电站功率控制是光伏发电并网控制的核心环节,其过程是通过光伏电站并网控制系统实现光伏发电的有功功率控制和无功功率控制。光伏电站并网控制系统是指安装于光伏电站内,自动接收调控(集控)中心下发的有功功率限制指令、电压(无功)目标指令,并通过自动闭环调节站内逆变器、无功补偿设备(SVC/SVG)等设备的有功/无功出力实时跟踪调控(集控)中心下发指令的系统,包括有功功率控制系统(AGC)和无功电压控制系统(AVC)。通过功率控制系统,电站可实现对电站发电功率的控制和电压的调整。

(2) 系统结构及功能。

光伏电站功率控制系统结构如图 1-3 所示,其实现过程为:光伏 AGC/AVC 服务器和远动机及站内逆变器、SVC/SVG 等设备都是接在同一个网络上(如果不能直接接入以太网,可以通过规约转换装置实现接入),服务器通过远动机向调度主站上送光伏电站 AGC/AVC 站内各种控制信息和实时数据;同时通过远动机接收调度主站下发的有功/无功电压控制和调节指令,服务器根据接受的指令,按照预先制定的控制策略进行计算,并将计算的结果或者命令通过网络下发到各个逆变器或者 SVC/SVG 装置,最终实现全站有功功率、无功功率/并网点电压的控制,达到电力系统并网技术要求。

1) 有功功率控制系统(AGC)。在光伏电站中,光伏有功功率控制系统接收来自调度的指令或电站本地内的有功指令,并按照制定好的控制策略分配给光伏电站内的逆变器,逆变器根据分配有功功率值,实时调节

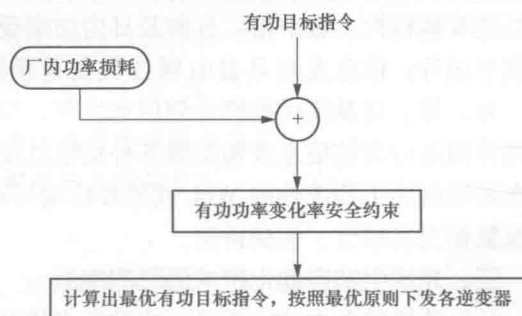


图 1-3 光伏电站并网控制系统典型结构

有功功率，从而实现整个光伏电站有功分配和调节。

2) 无功电压控制系统 (AVC)。光伏电站自动电压控制系统接收来自调度的并网点电压目标值，通过控制策略实时调节并网逆变器、无功补偿设备 (SVG/SVC) 的无功补偿值或变电站升压变压器的分接头进行光伏电站内的整体无功补偿，从而使并网点电压处在正常运行范围内。与常规电站 AVC 调节不同之处是，光伏电站 AVC 调节首先调节逆变器的无功，其次调节无功补偿装置无功。

3) 柔性功率控制系统。柔性功率控制系统是在电站侧功率控制装置运行状态信息、SCADA 信息、状态估计数据、光伏预测数据等多源数据整合的基础上，实现在电网各种运行方式下，满足各光伏送出断面和设备安全前提下，制订光伏实时发电计划，使得光伏发电功率最大。

与传统的有功功率控制系统相比，柔性功率控制系统在提高光伏发电的消纳能力和电网的安全稳定运行水平方面具有明显的优势。突出特点是能够实现光伏在线接纳能力评估、光伏电站发电计划执行情况、在线监视与涉网性能指标、在线考核评估等功能，系统有很强的实时性，能够解决由于各种原因引起的受限断面未充分利用问题。

5. 二次系统安全防护

电力二次系统是指各级电力监控系统和调度数据网络，以及各级电网管理信息系统、电站管理信息系统、电力通信系统及电力数据通信网络等构成的大系统。通过建立电力二次系统安全防护体系，有效抵御黑客、恶意代码等各种形式的攻击，尤其是集团式攻击，重点是保障电力二次系统安全稳定，防止由此引起电力系统事故。

二次系统安全防护的总体策略为“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”。光伏电站基于现场二次系统的重要程度，划分为生产控制大区和管理信息大区，生产控制大区又分为控制区 (安全区 I) 和非控制区 (安全区 II)。光伏电站计算机监控系统、并网控制系统、相量测量装置位于安全 I 区，功率预测系统、信息申报与发布系统位于安全 II 区，天气预报系统位于管理信息大区。二次系统安全防护工作的重要措施是做好各业务系统的边界防护，光伏电站安全 I 区和安全 II 区自动化系统之间设置防火墙，实现逻辑隔离，在生产控制大区与管理信息大区之间设置电力专用横向单向安全隔离装置，光伏电站生产控制大区自动化系统与调度主站通过电力调度数据网进行通信，且在纵向连接处设置有专用纵向加密认证装置。

6. 信息申报与发布

信息申报与发布系统包含数据申报与信息发布两个功能模块，数据申报具备电站主体信息及逆变器特性参数申报，日前及日内功率受阻等运行信息申报，市场模式下电站各类竞价数据申报等；信息发布具备电网各类负荷预测信息发布，日前及日内短期交易信息发布，年、月、周、日及临时检修计划信息发布，日前及日内发电计划信息及计划校核信息发布，电站并网运行考核信息及辅助服务补偿信息发布，通知公告发布与监视等功能。信息申报与发布系统解决了传统外网 Web 或邮件传输导致的信息安全问题，为电站和调度机构信息沟通及数据交互搭建了便捷桥梁。

三、光伏电站自动化技术面临的挑战

(1) 传统的电力监视手段不能满足光伏电站远程运维需要。

光伏电站监控与传统的电力监控相比，需要监视的设备更多，采集的数据点数量庞大，

设备多数部署在荒漠无人地区，迫切需要能够远程全方位的协同维护，包括基于无线专网的移动检修、远程巡检、智能高级应用等。因此，需要探索如何在满足电力二次安全防护要求的基础上，充分利用硬件资源，实现大量设备的接入和数据的处理，从而提升光伏电站运维效率。

(2) 现有的功率预测技术不能适应超大规模光伏电站群调度运行需要。

与国外分布式光伏电站开发不同，我国光伏采用大规模集中式和分布式并举的开发模式。随着我国光伏电站接入规模的增大，超大规模光伏电站群的出现，光伏电站功率预测作为电网调度运行的基础性数据在保障电网安全稳定运行方面的作用越来越大，现有的光伏功率预测技术及运行模式已不能适应电网调度运行的需要。为适应未来的光伏发展需求，首先需结合大数据、云计算、移动互联网等新技术，深入研究光伏功率预测模型与算法，进一步提高现有功率预测精度。其次完善适应我国光伏发电快速发展的功率预测评价和考核体系，激励光伏发电企业持续优化光伏功率预测精度的动力，使光伏发电功率预测技术朝着更高水平方向发展。

(3) 现有的 AGC/AVC 技术不能适应超大规模尤其是含大量组串式光伏逆变器的光伏电站功率运行控制需求。

当光伏电站超出一定规模之后，随着容量的上升，逆变器的数量也不断增加，对 AGC/AVC 服务器的控制点数和计算速度及网络带宽将提出更高的运行控制需求。对于站内出现大规模组串式光伏逆变器的情形，对于传统 AGC/AVC 系统而言，控制目标逆变器数目相比集中式逆变器会出现几十倍级量的增加，这可能导致 AGC/AVC 系统出现控制计算、容量和通信等各方面的瓶颈。这种挑战的解决，除了要提高 AGC/AVC 服务器性能外，更要在 AGC 系统架构方面寻找突破口，比如在光伏方阵中增设方阵 AGC 装置的站内分层分布式的 AGC 系统架构。

小结

光伏电站自动化技术是电网和电站安全运行的重要支撑工具，电站日常运行无时不在利用自动化技术。本章介绍了全球和我国太阳能资源分布，光伏发电现状及发展趋势，概述了电力系统自动化技术的发展和在光伏电站中的应用，并对光伏电站自动化系统结构、各子系统的组成及主要功能进行了简要介绍，包括计算机监控系统、同步相量测量装置、功率预测系统、并网控制系统和信息申报与发布，以及支撑业务系统通信的网络和安全防护设备等。

思考题

1. 简述我国太阳能资源的分布情况，哪些地区属于资源较丰富区？
2. 光伏电站自动化系统的作用是什么？由哪些子系统构成？

光伏电站计算机监控系统

第一节 计算机监控系统简介

随着光伏发电在国内市场的大规模开发和利用,光伏发电技术已经逐步趋于成熟和完善。如何对光伏电站实现高效的实时监控,满足光伏电站并网的需求,提高电网的稳定性和可靠性,是当前电网亟须解决的问题,这就需要建立一套适应光伏电站信息监控的标准和系统。光伏发电实时监控系統应遵循安全可靠、技术先进、适度超前、经济合理、符合国情的原则,满足电力系统自动化总体规划要求,充分考虑光伏发电技术的发展需求。

一、计算机监控系统的形成与发展

为保障光伏电站安全、经济运行,须建立光伏电站的监视、测量、控制和保护系统,以实现电站电气设备的监视及控制,同时为运维值班人员提供信号。

(一) 计算机监控系统主要发展阶段

1. 传统监控系统阶段

由各种继电器、测量仪表、断路器、光字牌、中央信号屏、信号灯、警铃、喇叭及一次设备的辅助触点通过控制线缆连接,构成二次回路,通过控制屏和中央信号屏实现对光伏发电监视、测量、计量、告警和控制等功能。

2. 监控改进阶段

随着电网的发展,传统的监视、测量和控制系统已经不能满足安全稳定运行的要求。远方传输系统(简称远动系统)应运而生。除传统的监视、测量和控制系统外,增加了一套远方终端装置(RTU)。RTU自动采集相关的测量量、设备的状态量和信号量,通过数据传输通道将这些量传送给远方调度端,并在调度模拟屏上显示,实现对厂站的“遥测”和“遥信”功能。远方调度值班人员也可通过远动系统,将控制和调节命令传送给站端RTU,实现对断路器的“遥控”和变压器有载分接头的“遥调”。

随着远动技术的发展,远动装置的技术性能不断提高,应用功能不断扩展,出现了以RTU为中心的监控系统,它是在增强型RTU设备基础上增设了后台监视、测量显示和控制功能。

3. 计算机监控阶段

随着计算机技术、通信网络技术和现代控制技术的快速发展,厂站计算机监视、测量和控制系统(简称计算机监控系统)发展迅速。计算机监控系统应用计算机技术、自动控制技术、信息处理和传输等技术,对厂站监控系统功能进行了重新组合和优化设计,取代了传统的监控系统,而且与站端RTU合二为一,实现了软硬件和信息资源共享。

（二）计算机监控系统分类

根据设计思想的不同，计算机监控系统分为两种模式：面向功能设计的计算机监控系统和面向对象的分层分布式监控系统。

1. 面向功能设计的分布式监控系统

系统由后台机、总控单元及遥测、遥信、遥控装置组成，集中组屏安装。测量单元采用交流采样技术，减少了变送器数量及变送器种类。系统具有较完善的监视、测量功能，其高级应用功能有所增强。缺点是可扩展性和控制功能不强。

2. 面向间隔和面向对象的分层分布式监控系统

系统由站控层和间隔层两部分组成，并用分层分布、开放式网络实现连接。间隔层集测量、监视和控制功能于一体，由若干按间隔配置的保护测控装置、规约转换装置等设备组成，并采用面向对象设计。保护测控装置实现本间隔设备的测量数据、状态量采集和判别，相关设备的监测及对开关设备的控制等功能。站控层由主机、操作员站和各种功能站构成，提供站内运行的人机联系界面，通过计算机网络与间隔层通信，实现对间隔层设备的管理及控制功能，形成全站监控、管理中心，并通过远动通信设备和远方调度实现“四遥”（即遥测、遥信、遥控和遥调功能）。分层分布式监控系统具有配置清晰、灵活、可扩展性好等优点。

二、计算机监控系统的基本概念及特点

计算机监控系统以较高测量精度，采集相对完整的电力系统数据和信息，利用计算机的高速计算能力和逻辑判断功能完成对一次设备和电网运行状态的监视、测量和控制任务，而且进一步扩大了监视的覆盖面和应用功能，增强了运维人员和系统调度员把握安全控制、事故处理的主动性，减少或避免误操作、误判断，缩短事故停电时间，最终提高运行人员的工作效率，提升变电站安全稳定运行水平。

计算机监控系统的输入回路将各类信息转换为数字量，并通过计算机通信网络进行数据交换，实现信息共享。各种功能在微机硬件支持下，由软件和人机接口设备、输入和输出等设备协调完成。

光伏电站计算机监控系统具有功能综合化、结构微机化、操作监视屏幕化、运行管理智能化的基本特征：

（1）采用模数转换、数字滤波和处理技术，能保证各种量测的测量精度。采用防抖技术、冗余技术以及在线自检、自诊断等技术，提高了监视、控制的准确性和可靠性。

（2）厂站设备和电网运行状态、故障信息、设备操作等采用屏幕显示，值班员可通过计算机进行全面监视与操作，取代了常规中央信号屏、控制屏等有关设备，为值班人员提供了方便直观的监控条件。

（3）计算机监控系统可提供电压无功自动调节控制、电器操作防误闭锁及统计报表自动生成等高级应用功能。

（4）减少重复性硬件设备，节约大量控制电缆，缩小控制室建筑面积，经济性较好。

（5）站内温度、湿度、污染、振动，特别是强电磁干扰都对计算机监控系统的正常运行带来不利影响，必须采用有效技术措施，使监控系统满足现场运行环境和电磁兼容技术标准的相关要求。

第二节 计算机监控系统基本结构

目前，厂站端应用的计算机监控系统基本结构可分为集中式和分层分布式两种结构，其中分层分布式计算机监控系统已成为光伏电站计算机监控系统发展的主流。

一、集中式计算机监控系统的结构及特点

(一) 基本概念

以电站为对象、面向功能设计的计算机监控系统称之为集中式计算机监控系统，即各系统功能都以电站为一个对象，相对集中设计，而不是以电站内部的某原件或间隔为对象独立配置的方式。

(二) 基本结构及组成

集中式计算机监控系统结构的微机保护、计算机监控和远动通信的功能由不同的计算机来完成。例如，数据采集、数据处理、远动、开关操作和人机联系功能可分别由不同计算机完成，其结构如图 2-1 所示。

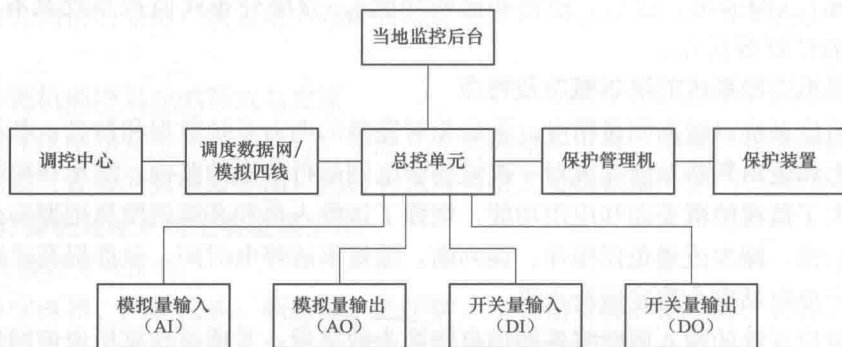


图 2-1 集中式变电站计算机监控系统结构

(1) 模拟量输入单元。

根据模拟量采样方式不同，分为直流采样和交流采样两种模式。直流采样是将来自电流互感器二次侧 5A/1A 或电压互感器二次侧 100V 的输入信号，经过变送器变换为 0~5V 或 4~20mA 的直流电压或直流电流，再通过 A/D 转换、采样、标度变换等环节，输入给计算机系统进行处理；交流采样则是把电流互感器、电压互感器输入信号，直接接入监控系统中的交流模拟量输入模块进行采样，通过 A/D 转换将其转换为数字量，并通过计算获得相应的电气量。无论采用哪种模式，均须在模拟量输入模块中进行 A/D 转换，把模拟量转换为计算机可以处理的数字量，并需满足一定的精度要求。

(2) 数字量输入单元。

数字量输入单元也叫开关量输入（开入），它是把来自一、二次设备的各种无源触点信号，经过光电耦合器隔离之后变成二进制信号。

(3) 数字量输出单元。

数字量输出单元也叫开关量输出（开出），它是把来自监控后台或远方调度下发的命令“翻译”成一种开关量输出，再通过继电器触点的输出控制一次设备的断开或闭合，以及主

变压器分接头挡位的上升与下降等。

(4) 总控单元。

总控单元作为中央通信控制器，是整个系统的核心，主要负责与各数据采集单元及当地监控后台的信息交互，接收并处理数据采集单元送来的信息，并转发至当地监控后台和远方调度，同时将当地监控后台和远方调度下发的命令下达给各数据采集单元。此外，它还用于完成与微机保护、自动装置等智能电子设备的通信。

(5) 人机联系。

人机联系即监控后台，完成当地显示、告警、控制和制表打印等功能，彻底取代了传统的仪器、表盘等。运行人员只需面对显示器，通过键盘或鼠标，即可观察和了解全站运行状况，并可对全站的断路器等设备进行分、合闸操作。

(三) 主要优缺点

(1) 主要优点：功能单元间相对独立，互不影响；具有较为完善的人机接口功能，综合功能强；结构紧凑，体积小，可大大减少占地面积；造价低，尤其对 110kV 或规模较小的电站更为合适。

(2) 主要缺点：运行可靠性较差。全站的信息先由总控单元汇总处理，再分发给监控后台和远方调度，一旦总控单元出现故障，将造成监控后台和远方调度无法实时监控电站信息。

二、分层分布式计算机监控系统的结构及特点

(一) 基本概念

分层分布式计算机监控系统是以电站内的电气间隔和元件（变压器、电抗器、电容器等）为对象开发、生产、应用的计算机监控系统。

分层分布式计算机监控系统按结构可分为三层：站控层、间隔层和过程层，每层由不同的设备或子系统组成，完成相应的功能。通常，电站计算机监控系统由站控层和间隔层两个基本部分组成。

(二) 基本结构

电站计算机监控系统由站控层与间隔层两个基本部分构成，并用分层分布、开放式网络实现系统连接。站控层为全站设备监视、测量、控制和管理的中心，站控层与间隔层可通过光缆或双绞线与间隔层直接连接，也可通过前置设备连接。间隔层按照不同的电压等级和电气间隔单元，以相对独立的方式分散在各个保护小室中，能独立完成间隔层设备的就地监控功能，其基本架构如图 2-2 所示。

其中，站控层包括主机、操作员站、远动工作站、工程师站、公用接口装置及站控层网络设备等，形成全站监控、管理中心。能提供站内运行人机界面，实现间隔层设备的管理控制等功能，并可通过远动工作站和数据网与各级调控中心进行通信。

间隔层由工控网络/计算机网络连接的保护测控装置、通信接口单元及间隔层网络设备等若干个监控子系统组成。各个监控子系统具有独立运行能力，即具有一定的数据处理、逻辑判断、安全检测等功能，其设置数量依电站规模而定，且在站控层或网络失效时，仍能够独立完成对间隔设备的就地监控。

目前，站内分层分布式计算机监控系统设备布置主要有三种类型：集中组屏结构、分散与集中相结合结构和全分散结构。

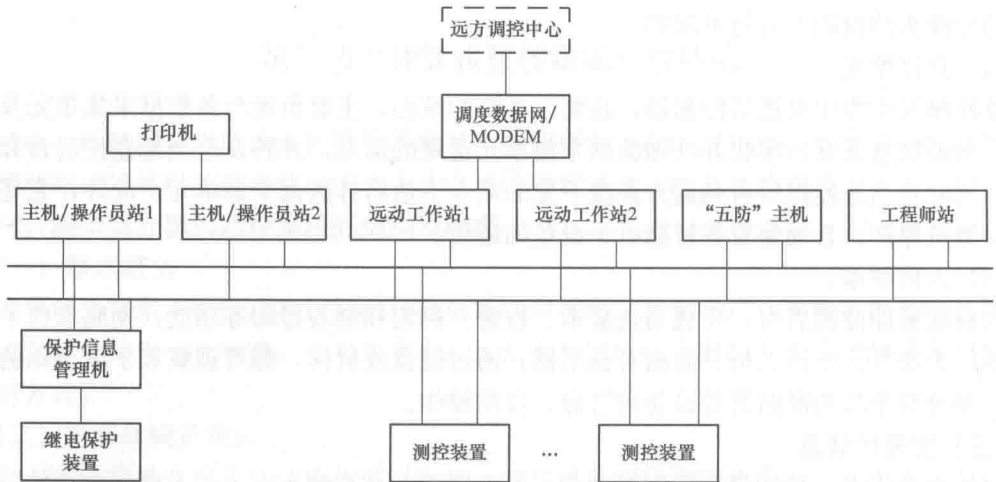


图 2-2 分层分布式计算机监控系统基本架构

(三) 主要硬件设备及其功能

1. 站控层设备

主要包括监控后台主机、操作员站、工程师站、远动工作站、公用接口装置、时钟同步系统等，其通常放置在主控室或主控楼计算机室。

(1) 监控后台主机。

监控后台主机具有主处理器及服务器的功能，为站控层数据收集、处理、存储及发送的中心，同时也可兼做操作员站。

(2) 操作员站。

操作员站是站内计算机监控系统的主要人机交互平台，用于图形及报表显示、事件记录、报警状态显示和查询、设备状态和参数的查询、操作控制命令的解释和下达等。通过操作员站，运行人员能实现对全站电气设备的运行监测和操作控制。

(3) 工程师站。

工程师站主要供计算机监控系统维护管理员进行系统维护使用，可完成数据库的定义和修改，系统参数的定义和修改，报表的制作和修改，以及网络维护、系统诊断等工作。

(4) 远动工作站。

远动工作站具有远动数据处理及通信功能，通过调度数据网或模拟四线将远动信息传送到远方调控中心；远动信息采集遵循直采直送原则，即远动工作站直接采集间隔层信息，经远动工作站处理后按照调控中心要求的远动通信规约上送各级调控中心，完成与调度端的数据交换。远动工作站具备向多个调控中心转发数据的能力，一般至少具备 3 个及以上调控中心。

(5) 公用接口装置。

用于将站内智能设备的通信协议转换成标准通信协议。

(6) 时钟同步系统。

全站设置统一的时钟同步系统，确保站内所有设备的时间统一。一般要求 330kV 及以上电站时钟同步系统按照双主时钟配置，保护小室配置扩展时钟，110kV 及以下电站按照单时钟配置，但其时钟源均要求可接受北斗卫星和 GPS 卫星同步。

2. 间隔层设备

主要包括保护测控装置、间隔层网络与站控层网络的接口和通信管理机等。间隔层设备直接采集和处理现场的原始数据，通过网络传送给站控层计算机，同时接收站控层发出的控制操作命令，经过有效性判断、闭锁检测和同步检测后，实现对一次设备的操作控制。间隔层也可独立完成对断路器和隔离开关的控制操作。间隔层设备通常安装在各保护小室，保护测控装置按电气设备间隔配置，各保护测控装置相对独立，通过通信网互联。

3. 网络设备

包括站控层网络设备和间隔层网络设备，通常由网络交换机、光/电转换器、接口设备和传输介质等组成。

(1) 站控层网络设备。

站控层网络设备主要由网络交换机、监控主机等设备组成，负责站控层设备间，以及站控层与间隔层网络设备间的通信。

(2) 间隔层网络设备。

间隔层网络设备通常由网络交换机等组成，实现间隔层设备与站控层网络设备及间隔层设备之间的通信。

(3) 网络传输介质。

网络传输介质可采用屏蔽双绞线、同轴电缆、光缆或以上几种方式的组合。

根据站控层和间隔层设备之间不同的通信方式，也对应不同的网络拓扑结构。目前，光伏电站计算机监控系统主要采用串行数据总线和工业以太网等。

4. 信息流程

反映电网运行状态的各个电气量、非电气量通过不同的变换器或传感器转换成一定幅值范围内的模拟电信号；模拟量通过保护测控装置的 A/D 转换电路转换为数字信号，状态量通过开入量采集电路转换为数字信号，保护测控装置将获取的数字量进行编码并以一定的通信协议传送到站控层的通信网络；通过站内通信网络实现间隔层设备与站控层设备信息共享，通过远动工作站和专用远动传输通道向远方调控中心传输信息。信号下传则按相反的流程化传输，控制命令的执行通过保护测控装置的开出单元输出，作用到对应设备的控制回路。

(四) 主要特点

(1) 结构分层分布。

按分层分布式设计，即系统框架由间隔层的各种保护测控装置和站控层计算机设备构成。

(2) 面向对象设计。

以站内各电气间隔（如变压器、线路、电容器）为对象开发、设计、生产和应用的计算机监控系统，将站内每个断路器间隔对应的数据采集、保护和控制等功能集中由一个或几个智能保护测控装置完成。

(3) 功能独立。

面向间隔层的各种线路、元件设备，无论是测控、保护独立单元还是保护测控合一装置，它们都是一个智能电子装置（IED），即每个 IED 都拥有自己的 CPU、输入输出设备、电源、通信口、外接端子以及机箱、面板等，并完全可以加电独立运行，完成对某个电气间

隔的测量、控制或保护等功能，每个 IED 与电气间隔形成一一对应关系。

(4) 可靠性高。

为了提高监控系统的可靠性，系统采用按功能划分的分布式多 CPU 结构。各功能单元基本上由一个 CPU 组成，如线路保护单元、电容器保护单元、备自投控制单元、低频低压减载控制单元等。也有一个功能单元由多个 CPU 完成，如变送器保护，包括主保护和后备保护，其保护功能由 2 个或 2 个以上的 CPU 完成。这种按功能设计的分散模块化结构具有软件相对简单、组态灵活、调试维护方便、可靠性高等特点。

(5) 模块化结构，运行维护方便。

由于各个功能模块都由独立电源供电，输入、输出回路相对独立，单个模块故障只影响局部功能，不一定影响全部功能。各功能模块面向对象设计，其软件结构相对简单，因此调试简单方便，便于扩充。

(6) 安装布置灵活。

保护测控装置可直接安装在断路器柜上或安装在断路器间隔附近，相互之间用光缆或其他通信电缆相连，同时也可在控制室或保护小室内按保护、测控等功能组屏。

总之，分层分布式计算机监控系统可大幅度减少连接电缆，有效抑制电缆传送信息的电磁干扰，其可靠性高，便于维护和扩展，大量现场工作可在设备制造厂家一次性完成，该系统代表了电站计算机监控系统应用的主流方向。

第三节 分层分布式计算机监控系统网络结构

电站计算机监控系统的发展与电子、计算机、通信和网络等技术的发展密切相关，网络通信技术在电站计算机监控系统中起着至关重要的作用。对于分层分布式计算机监控系统，网络通信技术的发展直接决定着系统结构、系统功能的实现和性能的优劣。

目前，分层分布式电站计算机监控系统的常用网络通信方式归纳起来主要有三大类，即串行数据通信、现场总线和以太网。

一、通信方式

(一) 串行数据通信

串行数据通信系统是以站控层主单元为系统中心，以间隔层测控装置或测控保护一体装置为外围，通过串行数据通信接口组成的计算机监控系统。通常在间隔层采用 RS-232、RS-485、RS-422 等通信接口，将其中的监控和保护设备连接起来，并通过主单元与后台系统进行串行数据通信，将间隔层的信息传送至站控层，同时下达来自后台系统或远方调控中心的控制命令。串行通信介质多采用屏蔽双绞线。根据间隔层设备与站控层主单元的通信连接方式，串行数据总线主要有星型和总线型连接方式。

1. 星型网络结构

星型网络结构是指以站控层主单元为系统的中心，以间隔层的保护测控装置为外围，每一个保护测控装置与主单元之间按点对点方式连接。星型网络结构不允许设备之间直接通信，必须通过主单元才能实现间隔层设备间的通信。星型网络结构的连接介质多采用屏蔽电缆，一般距离在 50m 左右。星型网络结构如图 2-3 所示。

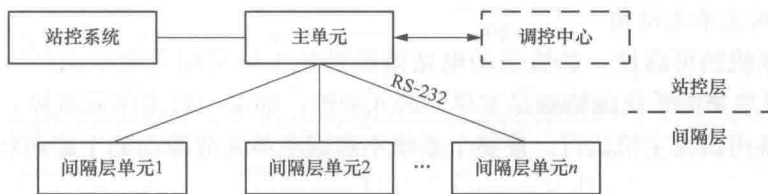


图 2-3 星型网络结构

(1) 星型网络结构的优点主要有:

- 1) 可靠性高。单个连接点故障只影响一个设备, 不会影响整个系统的通信。
- 2) 便于集中控制和故障诊断。由于每个节点都直接连到主单元, 因此容易检测和隔离故障, 可方便地将故障节点从系统中删除。
- 3) 访问协议简单。任何一个连接只涉及主单元和一个间隔层设备, 因此访问的方法简单。

(2) 星型网络结构的主要缺点有:

1) 通信介质的辐射相对较为复杂, 每个装置均需要独立的通信介质, 通道利用率低而且成本较高。

2) 瓶颈问题突出, 一旦主单元出现故障, 将影响整个系统的通信。

3) 各间隔层设备之间的横向通信必须通过主单元进行, 通信机制复杂且效率不高。

为增加系统的可靠性, 星型网络结构的电站计算机监控系统也可采用双主控的方式。但由于系统结构复杂, 软件实现难度大, 实际中已基本不适用该结构系统。

2. 总线型网络结构

总线型网络结构是指在主单元与间隔层设备之间的通信方式采用串行总线形式的结构, 其基本结构如图 2-4 所示。

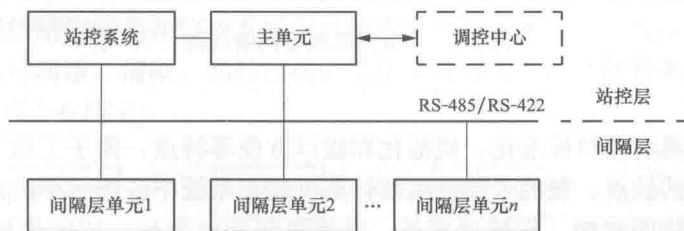


图 2-4 总线型网络结构

(1) 总线型网络结构的优点主要有:

- 1) 布线容易, 通信介质较省。
- 2) 结构简单, 运行可靠。
- 3) 方便节点的增减, 操作方便。

(2) 总线型网络结构的缺点主要有:

- 1) 故障诊断和故障隔离困难。
- 2) 采用主从轮询通信机制, 通信速率较星型网络结构慢, 通信效率低, 难以满足较高的实时性要求。