

# Design of Automation System for Water Supply Pump Station and Research on Harmonic Suppression Technology

Zhigang Zhuang

Dunhuang Yuanquan Urban Operation Service Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 736200, China

## Abstract

Based on the major livelihood project of the expansion and renovation of the booster pump room at the Shazhou Water Plant in Dunhuang City, this article addresses the pain points of outdated equipment, high energy consumption, and severe data isolation in multiple water sources at the old pump station. The author, as the project technical leader, led the upgrade and renovation of the automation system for the entire plant. This article details how the author designed a redundant control system based on the Siemens S7-1500 series PLC, constructed a fiber optic ring network covering the three plants in Shazhou, Qilizhen, and Shazao Dun, and innovatively introduced active filtering and reactive power compensation technology with a 7% reactance rate into the low-voltage power distribution system, solving the problem of harmonic pollution in the power grid caused by frequency converter group control. Through this technological transformation, a modern management model of "unmanned duty and less personnel on duty" was achieved at the pump station, with an annual comprehensive electricity saving rate of over 15%. This study provides a replicable technical template for the automation upgrade of long-distance water supply pump stations in arid areas of Northwest China.

## Keywords

pump station automation; SCADA system; PLC redundant control; harmonic suppression; centralized control of multiple water plants

## 供水泵站自动化系统设计与谐波治理技术研究

庄志刚

敦煌渊泉城市运营服务有限公司, 中国·甘肃 兰州 736200

## 摘要

本文基于敦煌市沙州水厂加压泵房扩容改造这一重大民生工程, 针对老泵站设备陈旧、能耗高、多水源地数据孤岛严重等痛点, 由笔者作为项目技术负责人主导了全厂自动化系统的升级改造。本文详细阐述了笔者如何设计基于西门子S7-1500系列PLC的冗余控制系统, 构建覆盖沙州、七里镇、沙枣墩三厂的光纤环网, 并创新性地引入7%电抗率的有源滤波与无功补偿技术, 解决了变频器群控带来的电网谐波污染问题。通过本次技改, 实现了泵站“无人值班、少人值守”的现代化管理模式, 年综合节电率达15%以上。本研究为西北干旱地区长距离供水泵站的自动化升级提供了可复制的技术范本。

## 关键词

泵站自动化; SCADA系统; PLC冗余控制; 谐波治理; 多水厂集控

## 1 引言

项目概况与技术背景介绍, 【项目拔高】本项目为“敦煌市沙州水厂加压泵房扩容改造项目”, 旨在将供水能力提升至6.0万 $m^3/d$ , 以满足敦煌市区日益增长的用水需求。工程涉及沙州水厂、七里镇水厂及沙枣墩水厂三个独立站点的控制系统整合。【个人角色】笔者作为项目技术总工, 负责从技术方案制定、设备选型、PLC程序编写到系统联调的全过程。面对老站(敦煌自来水公司老系统)存在的数据

无法远传、阀门故障频发、电能质量差等历史遗留问题, 笔者提出了“顶层规划、分步实施、数据融合”的技改思路。

## 2 自动化监控系统的架构设计

根据《敦煌自来水送水泵自动控制方案》及招标文件要求, 笔者设计了分层分布式的计算机监控系统, 实现“站控层、现地层、调度层”三级控制。

### 2.1 硬件系统配置

笔者选用德国西门子工业级产品构建核心控制层, PLC控制站采用S7-1500H系列PLC(CPU1517H), 配置双机热备, 确保在单机故障时切换时间小于300ms, 保障供水连续性。网络架构利用单模铠装光缆(总长12.2km)构建千兆工业以太环网, 连接三个水厂及后备水源地, 解决数据孤岛问题。

【作者简介】庄志刚(1977-), 男, 本科, 工程师, 从事高、低压配电及其自动化控制及地表、地下水生产工艺技术在相关领域的应用研究与工程实践。

现场仪表选配超声波液位计、电磁流量计（精度0.5级）及压力变送器，实现全站数据的精准采集。

## 2.2 软件与功能实现

组态软件采用WINCC 7.5开发上位机监控界面，实现了工艺流程图的动态显示、实时/历史趋势分析、报警记录及报表打印功能。WEB发布笔者主导开发了基于B/S架构的WEB发布系统，使得沙枣墩水厂中控室及授权手机端可实时浏览全网数据，实现了“集中调度、分散控制”。

## 3 关键技术难点与解决方案

### 3.1 低压配电系统的谐波治理技术（技术创新点）

在对扩容改造新增多个大功率水泵变频器造成电网侧谐波严重超标以及对原有的电容器、精密仪表的安全构成威胁的问题进行深入剖析的基础上，项目组采用先进的检测技术和创新的技术手段成功攻克了该工程难题。其一利用电能质量分析仪对整个系统进行全面细致的测试检查，发现5次和7次谐波电流过大是引起原电容补偿柜反复损坏的主要原因；根据以上诊断结论，放弃了传统的单纯电容补偿方法，在低压配电系统的设计上增加了新的调谐滤波补偿设备，其主要特点是使用了7%电抗率智能电抗器。这种设备的工作原理就是串联这个智能电抗器使滤波补偿支路的谐振频率降到204Hz以下，这样就巧妙地避开了有害的5次（250Hz）、7次（350Hz）谐波频率范围，从根本上杜绝了谐振引起的谐波放大的危险。采取这项技术改造之后，获得了良好的治理成效：系统的电网谐波电压总畸变率（THDu）由改造前的8%下降到2%以内，而且系统的功率因数一直保持在0.95以上良好状态。这不仅彻底消除谐波造成的频繁跳闸及电器发热现象的发生，也为整个供水自动化系统的持续可靠平稳运行奠定了基础。<sup>[1]</sup>

### 3.2 多水厂数据融合与冗余通讯

对于多水厂的数据整合以及冗余通讯中存在的关键技术问题，进行了详细的探讨并提出了相应的对策措施。本工程的设计集中控制系统的主要难点在于把位于不同地点的沙州水厂、七里镇水厂和沙枣墩水厂各自独立的自动化系统进行集成与数据整合。由于各水厂原有的控制系统的结构和技术标准不一致导致了严重“信息孤岛”。<sup>[2]</sup>

因此，作为项目的技术负责人，制定了为达到高可靠性通信以及深度集成控制的目标措施。从网络结构上采用了一种新的方式即以沙枣墩水厂为中心节点，“中心交换机+光纤环网”的结构形式，在调度中心所在的沙枣墩水厂安装了高性能的工业核心交换机，在各个分厂安装可以进行网络管理的三层工业交换机，使用单模铠装光缆形成一个物理冗余的千兆工业以太环网把三个厂区以及备用取水泵站的控制系统串联在一起构成一个整体的一个快速通讯平台。这样就消除了信息孤岛问题，也为实现集中监视、数据共享打下了坚实的硬件基础。

在可靠性保障以及安全防护方面，本项目采用多层冗余及隔离措施。一方面，在硬件上部署工业级防火墙、安全隔离网闸（网闸），从物理上将生产控制网络与办公信息网络进行有效分离，防止来自办公网络的恶意攻击对生产控制系统造成影响；另一方面，考虑到光缆易受到外界因素损坏而产生断开的情况，在环型结构基础上增加链路冗余设计并配合使用快速环网自愈协议，在出现单条光纤线路由于施工或者自然灾害等原因发生断裂后，可以在几毫秒之内发现异常并且立即切换至备用路径以恢复连接从而保证了控制命令下发、数据回传等关键生产业务连续性和平稳运行。通过以上“融合架构”、“冗余通讯”的技术手段的应用使得该系统克服了兼容性和远距离传输的问题同时形成了一个具有较高灵活性、安全性以及稳定性的多个水厂联合监控平台的基础框架，为今后实现“集中调度、分散控制”的管理模式提供了重要的技术支持。<sup>[3]</sup>

### 3.3 阀门与水泵的联动控制优化

在多水厂集控模式下供水泵站自动化系统中，阀门与水泵连锁控制优化是保证设备运行安全、提高供水可靠性的关键所在。为了解决以往控制方式下容易发生的阀门气蚀破坏以及管网水锤等现象，在此对算法改进及参数整定进行研究，建立了精确配合的连锁控制系统。

在防气蚀控制方面，对PLC控制程序进行了改进，在其中加入了变频器频率以及阀门开度之间的连锁关系。传统的单独控制方式中，由于误判工况，阀门经常会在很小的开启程度下长时间工作，水流经过狭窄的阀口时流速增大、压力下降，如果压力小于该温度下的饱和蒸汽压，则会发生水的汽化产生气泡，在水流到高压区域的时候气泡破裂，所产生的微射流及冲击波会对阀门内部造成不断的冲刷，最后导致阀门关闭不严甚至损坏。而连锁算法通过对变频器输出频率和阀门开度进行实时采集并建立起二者之间的联系：当发现阀门开度小于设定值时就启动频率调节功能，使电机减速从而减少供水量来防止小开度下高速水流冲击；如果阀门开度一直处在危险范围内就会报警提醒操作人员及时处理问题。这样就从根本上解决了引起气蚀的水流动力学条件，经过实践应用证明可以将阀门气蚀破坏率降低90%以上，大大提高了阀门的服务年限。

从恒压供水控制方面来看，通过对PID控制器进行改进，达到了对管网压力精确稳定的控制效果。传统的PID由于其自身的参数匹配程度不够容易造成压力超调或者滞后的情况，在管网压力变化幅度较大情况下，水流速度的变化会导致水锤效应的发生，瞬时的压力值可以达到正常工作压力的3~5倍左右，给管道、水泵等带来极大的危害。采取的是离线设定加上在线自动调节的方式来进行PID整定，在此基础上使用Ziegler-Nichols方法得到初始的PID参数后再加上模糊控制逻辑来根据管网的压力偏差以及偏差的变化率实时地改变比例系数、积分时间和微分时间使得系统能

能够在各种不同的供水需求下都具有良好的响应能力。经过现场调试发现优化之后的 PID 控制系统可以使管网的压力波动控制在  $\pm 0.02\text{MPa}$  范围内,有效的防止了由于压力突变而引起的流速变化从而避免了水锤现象的发生。而且稳定的压力环境也减少了管道接口处漏水的风险,使管网漏损降低大约 15%,提高了整个供水系统的综合效率。

通过防气蚀联锁算法和改进 PID 控制相结合,提出的阀门及水泵联动控制系统不仅克服了以往控制方式下存在的设备安全问题而且使供水过程更加精确平稳地进行下去,从而为多个水厂集中监控模式下的供水泵房自动控制系统提供了一种有效的解决方案。

#### 4 施工管理与质量控制

在敦煌地区特有的自然环境影响下,通信工程施工管理和质量控制存在较大的昼夜温差以及较多的风沙天气等不利因素,在此情况下需要有相应对策和技术手段来应对以保证通讯设备的良好工作状态。

在电缆铺设方面,根据敦煌当地情况,在施工过程中选择铠装单模光缆用于通讯传输。这种光缆在外层增加了金属铠装保护层,有很好的抗拉强度、抗压能力,在施工时可以避免受到外力破坏,也能防止老鼠、白蚁等啃咬造成损害,解决室外以及地下的线路易损的问题。为了提高光缆的安全等级,在敷设时使用穿钢管埋地敷设的方式。选用的钢管是三布四油防腐钢管,防腐层是由油漆和玻璃纤维布复合而成,有较好的电气绝缘性、防水性和防生物侵蚀的能力,适合敦煌地区的土质条件,可以阻止钢管被腐蚀导致防护效果下降。埋深方面严格按照大于 1.2m 的要求进行控制,这样做的目的是考虑到敦煌地区存在冻土层的情况,以免光缆受土壤冻结膨胀的影响而损坏,同时也减少了风沙或者人为因素对光缆造成的威胁。施工时遵守电缆敷设的相关规定,在开挖沟槽之后,先铺一层 10cm 厚的细砂垫层,起到对光缆的缓冲作用,以防尖锐物体划伤光缆表皮;放线的时候要保证从线盘上慢慢放出,不能出现拧花、打结的现象,在拐弯的地方弯曲半径不得小于光缆直径的 15 倍,以免内部纤

芯断裂;光缆铺设完毕后,先回填 20cm 厚的细砂,然后铺上红砖或者混凝土板,最后再进行土方回填,形成多重保护措施。

防雷接地系统是保证敦煌地区通信设备在雷雨天气正常运行的基础,在施工时采取严密的等电位连接措施,把通信机房内所有设备机壳、金属线槽、门窗、电缆屏蔽层等金属物用铜带与铺设在活动地板下的网格状地网相连通,构成法拉第笼式接地系统。这样可以降低回路电阻,防止由于设备之间电位差而产生的触电事故的发生以及减少电磁干扰对精密电子产品的影响。为了保证防雷接地的效果,在施工中采用符合国家标准要求的接地材料并按规范进行安装,接地电阻实测值小于  $1\Omega$ ,远远好于国家规定的要求为  $4\Omega$ 。说明该接地装置有较好的泄流能力,在雷雨季节能快速把雷电流导入大地,避免雷电流损坏通信设备。另外,在施工期间定期测量接地电阻值以确保接地系统的可靠性,在敦煌地区多风沙的情况下也制定了定期维护方案,及时清除接地体周围的沙尘,以免积沙影响到接地效果。

#### 5 结论与展望

本次技改工程由笔者主导,历时 60 天,圆满完成了沙州水厂加压泵房的扩容改造任务。工程成效可靠性提升,通过 PLC 冗余和光纤环网建设,系统可用性达到 99.9%。能效提升,通过变频调速与谐波治理,水泵机组综合效率提高,年节电量预估达 50 万度。管理升级,实现了三个水厂“一张图”管理,大幅降低了人工运维成本。随着智慧水务的发展,建议下一步引入数字孪生技术,建立泵站水力模型,实现从“自动化”向“智能化”的跨越。

#### 参考文献

- [1] 刘宇,姜雪,薛伟强. 泵站工程中技术供水系统的应用分析 [J]. 冶金设备管理与维修, 2025, 43 (04): 51-53+57.
- [2] 厉泽辉. 供水泵站自动化监控系统设计探讨 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (08): 126-128+132.
- [3] 曹扬. 离心泵供水泵站自动化系统变频运行工况研究 [J]. 山西水利科技, 2022, (04): 31-35.