PLC变频恒压供水电气控制系统的设计与实现

刘海波
中国二冶集团有限公司　内蒙古　包头　010000

摘　要：针对某工业区职工宿舍传统供水方式中水压波动大、能耗高、控制逻辑僵化等问题，本文提出基于PLC与变频调速技术的恒压供水电气控制系统方案。该系统以西门子S7-300PLC为控制核心，通过压力传感器实时采集管网水压信号，经模糊PID算法运算后输出控制指令，驱动MicroMaster430变频器调节水泵转速，实现供水管网压力的动态稳定。文中重点阐述电控系统的硬件架构（含传感器接口、执行器驱动电路）、PLC编程逻辑（包括水泵切换时序控制、故障保护联锁）及变频调速的电气实现方式，通过取代传统继电器-接触器控制模式，解决了用水波动时的水压失衡问题，综合节能率达23%。该电控方案为中小型工业与民用供水系统提供了可推广的模块化控制范式。

关键词：PLC电气控制；变频调速；恒压供水；模糊PID；电路联锁

1 引言

1.1 传统供水系统的电控缺陷

传统高位水塔或直接水泵加压供水方式采用继电器-接触器控制回路，存在三大技术局限：一是控制逻辑固定，通过机械触点实现水泵起停，无法根据用水量动态调节转速，导致白天高负荷时电机满功率运行、夜间低负荷时空载损耗；二是响应滞后，水压波动需通过压力开关触发动作，调节周期长达30-60秒，易造成管网水锤效应；三是电气可靠性差，接触器频繁吸合导致触点磨损，平均无故障运行时间（MTBF）不足1000小时。某工业区职工宿舍的运行数据显示，传统系统日均无效能耗占总耗电量的35%，且每年因水压不稳导致的管道维修成本超万元。

1.2 PLC变频电控系统的技术优势

基于PLC的变频恒压供水系统通过数字化电气控制实现突破：PLC作为核心控制器，通过梯形图编程实现灵活的控制逻辑，可实时处理压力传感器信号；变频器通过脉宽调制（PWM）技术调节电机供电频率，使水泵转速与用水量呈线性匹配；电气回路中设计完善的联锁保护（如过载、过压、缺相保护），通过PLC的高速计数器与定时器实现毫秒级响应。实际应用表明，该系统能将水压波动控制在±0.02MPa内，MTBF提升至8000小时以上，显著优于传统电控方案[1]。

2 变频恒压供水电控系统的组成与原理

2.1 电气控制系统的硬件架构

系统采用“传感器-控制器-执行器”三层架构，核心电气元件配置如下：

检测层：管道出口安装西门子QBE2003-P16压力变送器，将0-1.6MPa水压转换为4-20mA标准电流信号，经隔离模块SM 331接入PLC；水箱安装投入式液位传感器，输出24V开关量信号至PLC的DI模块，用于低液位保护。

控制层：主控制器选用西门子公司SIMATIC S7-300可编程控制器，具有丰富可灵活配置的硬件资源，内含时钟、高速计数器、显示器等。配置16点DI模块（SM 321）接收水泵运行状态信号，16点DO模块（SM 322）输出接触器控制信号，2路AO模块（SM 332）输出0-10V信号至变频器；扩展CP 343-1以太网模块实现远程监控。

执行层：3台水泵机组、1台西门子MicroMaster430专用泵变频器、阀门、自动开关、低压接触器、选择开关、过热继电器等。3台5.5kW水泵电机配置独立的接触器（LC1D32M7C）与热继电器（LRD32C），主回路采用塑壳断路器（NSX100N）保护。

电气原理为：压力变送器信号经A/D转换后进入PLC，PLC执行模糊PID算法计算目标频率，通过AO模块输出至变频器，驱动电机调速；当频率达到上限（50Hz）或下限（25Hz）时，PLC通过DO模块控制接触器实现水泵的工频/变频切换。

2.2 变频调速的电气实现

变频调速技术的核心是通过电力电子变换实现异步电机供电频率的连续调节，其电气实现涉及主电路拓扑、控制模式及能量转换三个维度。在恒压供水系统中，需同时满足调速范围宽（10-50Hz）、动态响应快（≤200ms）及运行效率高（≥90%）的技术要求。

2.2.1 变频调速的主电路拓扑

本系统采用交-直-交电压型变频器（MicroMaster 430），主电路由以下部分构成：

整流单元：6只二极管（D1-D6）组成三相桥式整流电路，将380V工频交流电整流为513V直流电（Ud =

1.35×380V），经电解电容C1-C3（4700μF/600V）滤波后形成稳定的直流母线；

逆变单元：6只IGBT（VT1-VT6）构成三相桥式逆变电路，通过SPWM（正弦脉冲宽度调制）技术将直流电逆变为频率可调的交流电，输出至电机定子绕组；

制动单元：当电机转速高于同步转速（如水泵惯性减速时），电机进入发电状态，能量反馈至直流母线导致电压升高，此时制动电阻Rb（100Ω/500W）通过IGBTVT7导通消耗多余能量，保护电容免受过压损坏。

2.2.2 转速与频率的数学关系及电气映射

异步电机的转速公式为：$n=\frac{60f}{p}(1-s)$

其中：式中，f为定子工作电源的输入频率，p为磁极对数，n为转子转速，s为转差率。

f为定子供电频率（Hz），通过变频器输出调节；

s为转差率（$s=\frac{n_0-n}{n_0}$），与电机负载成正比，空载时s≈0.02，满载时s≈0.05；

p为电机磁极对数，本系统水泵电机p = 2（同步转速n_0 = 1500r/min）。

在电气控制中，PLC的AO模块输出0-10V直流信号，经变频器内部A/D转换后对应0-50Hz输出频率，其转换公式为：$f=5\times U_{ref}$

式中U_{ref}为PLC输出的控制电压（V）。例如，当管网水压低于设定值时，PLC输出7.2V控制信号，变频器对应输出36Hz，电机转速为：

$n=\frac{60\times36\times(1-0.04)}{2}=1036.8r/min$（注：取满载转差率s = 0.04）

2.2.3 U/f曲线控制模式的参数配置

为保证电机在不同频率下的磁通恒定（Φ∝U/F），需通过变频器参数设置优化U/f曲线。本系统采用带低频电压补偿的线性U/f模式，关键参数配置如下：

P1300 = 0：选择线性U/f控制模式；

P1310 = 1.1：额定电压（380V）下的频率比，即50Hz对应380V；

P1311 = 10%：10Hz时的电压补偿系数，补偿因定子电阻压降导致的磁通衰减；

P1500 = 2：频率给定源选择模拟量输入（0-10V）。

补偿后的电压计算公式为：

$$U=\left(\frac{380}{50}\times f\right)+\left(0.1\times380\times\frac{10-f}{10}\right)(f\leqslant10Hz)$$

U = 7.6f（f > 10Hz）该配置使电机在5Hz时仍能输出额定转矩的80%，满足低流量时的稳定运行需求。

2.2.4 变频调速的能量转换效率分析

变频调速的节能原理源于水泵的轴功率特性：$P\propto n^3$（流量$Q\propto n^3$，扬程$H\propto n^2$，故$P = QH\propto n^3$）。通过实测数据对比（见下表），当用水量降至50%时，电机转速从1480r/min降至740r/min，功率从5.5kW降至0.68kW，节能率达87.6%。

工况	工频运行	变频运行（50%流量）	节能率
转速（r/min）	1480	740	-
电流（A）	11.2	2.8	-
功率（kW）	5.5	0.68	87.6%

（注：测试条件为管网压力0.3MPa，环境温度25℃）

在电气回路中，能量损耗主要来自三部分：

①变频器自身损耗（约3%，含IGBT开关损耗与整流桥导通损耗）；

②电机附加损耗（约2%，高频载波导致的铁损增加）；

③线路损耗（约1%，电缆电阻的I^2R损耗）。

总系统效率可达94%，显著高于传统节流调节方式（70-75%）。

2.2.5 变频与工频切换的电气联锁

恒压供水系统中，水泵需在变频与工频模式间切换（因故障维修、调试或特定用水工况），但两者直接接电机会引发电源冲突导致故障，故需严谨电气联锁保障安全切换。

1#泵变频运行时，KM4接触器吸合，电机接变频器输出（U1、V1、W1），转速可调以适应压力变化；切换至工频运行时，KM1接触器吸合，电机接50Hz、380V工频电源（L1、L2、L3），恒定转速适用于水量大且稳定的工况。

为杜绝KM1与KM4同时吸合，PLC程序设互锁逻辑：Q0.0与Q0.3常闭触点互串，一方吸合时另一方因触点断开无法动作。切换遵循“先断后合”时序，变频切工频时，先断KM4，延迟100ms确保其断开后再合KM1；工频切变频时，先断KM1，延迟100ms后再合KM4，避免短路，保障系统安全。

2.3 控制逻辑的电气编程实现

PLC程序采用模块化设计，核心包括：主程序OB1：循环调用压力采集、PID运算、水泵切换等功能块；中断程序OB35：100ms定时中断，执行压力信号滤波与模糊规则运算；功能块FB41（PID_CONTROL）：配置比例系数Kp = 3.5、积分时间Ti = 20s、微分时间Td = 5s，实现水压闭环控制；切换逻辑：当1#泵变频运行至50Hz且持续30秒（TON定时器设定），PLC输出信号使KM1接触器吸合（1#泵切换至工频），同时KM4接触器吸合（2#

泵变频启动），切换时序通过PLC内部辅助继电器互锁，避免电源冲突。手动模式下，通过转换开关（SA1）将DI信号接入PLC，强制触发对应水泵的工频运行指令，用于故障检修时的应急供水。

3 电控系统的工程应用

3.1 现场配置与接线设计

某工业区职工宿舍供水系统配置3台水泵（两用一备），电气柜采用上下分区布局：上层为PLC与变频器控制单元，下层为主回路接触器与保护元件。

压力变送器的4-20mA信号经屏蔽线接入SM331模块的通道1，屏蔽层单端接地（PE端子）；PLC的DO模块输出点Q0.0-Q0.5分别控制KM1-KM3（工频接触器）与KM4-KM6（变频接触器），输出回路串联24V中间继电器（MY2N-J）增强带载能力；

变频器的故障输出端（RELAY1）接入PLC的I0.0，实现故障联锁停机。

系统启动后，1#泵变频运行，压力传感器实时反馈值与设定值（0.3MPa）比较，差值经PID运算后调节频率；当1#泵满频运行仍不足时，切换至工频并启动2#泵变频，以此类推；减泵逻辑相反，从最后投入的水泵开始停运。

3.2 模糊PID控制的电气实现

针对宿舍用水的随机性（如早晚高峰波动大），传统PID易出现超调[2]。PLC程序中嵌入模糊控制功能块：

3.2.1 输入量化：将水压偏差e（-0.1-+0.1MPa）与偏差变化率ec（-0.05-+0.05MPa/s）量化为7个模糊等级（NB-NM-NS-ZO-PS-PM-PB）；

3.2.2 规则库：存储49条模糊规则（如“e = PB且ec = PS时，输出△u = PB”），通过PLC的数据块DB10存储；

3.2.3 解模糊：采用重心法将模糊输出转化为PID参数的修正量（△Kp、△Ti、△Td），实时更新FB41的参数。

实际运行表明，模糊PID控制使水压波动范围从±0.05MPa缩小至±0.02MPa，调节时间缩短至5秒以内。

3.3 保护电路的电气设计

系统设计多重电气保护：过载保护-热继电器（FR1-FR3）的常闭触点串联入接触器线圈回路，当电机电流超过1.2倍额定值时，立即切断电源；欠压保护-变频器内置欠压检测（阈值280V），触发时通过RELAY1输出信号至PLC，执行停机指令；液位联锁-当水箱液位低于下限（液位传感器LS1断开），PLC强制切断所有水泵输出，避免空转烧毁电机。

4 运行效果与技术总结

4.1 技术指标

系统投运后，实测数据如下：水压稳定度：±0.02MPa（传统方式为±0.1MPa）；

平均能耗：单泵运行功率从3.8kW降至2.1kW（夜间低负荷时）；切换响应时间：≤ 1秒（传统继电器控制为5-8秒）；故障率：0.2次/月（传统方式为1.5次/月）。

4.2 电控技术创新点

4.2.1 采用PLC与变频器的数字化通讯（USS协议），替代模拟量控制，提高频率调节精度至±0.1Hz；

4.2.2 设计接触器互锁电路与PLC程序双重保护，杜绝电源短路风险；

4.2.3 模糊控制算法通过PLC梯形图实现，无需额外专用控制器，降低成本[3]。

结论

基于PLC的变频恒压供水电控系统，通过模块化硬件配置、数字化编程逻辑与完善的电气保护，解决了传统供水方式的技术痛点。其核心价值在于将电气控制从“硬件联锁”升级为“软件定义”，不仅提升了系统稳定性与节能性，更便于后期通过程序优化适应不同用水场景。该方案可广泛应用于中小型工业与民用建筑的二次供水改造。

参考文献

[1]张军,王磊.基于PLC的变频恒压供水系统设计与实现[J].电气传动自动化,2018,40(3):28-32.

[2]刘芳,陈明.模糊PID算法在PLC变频恒压供水中的应用研究[J].自动化仪表,2020,41(5):68-71.

[3]赵伟,李娜.变频恒压供水系统的电气联锁保护设计[J].电工技术,2019(12):89-91.