

低压补偿电容器多参量联动智能保护装置设计研究

石绍利 郝雷 侯松凯 郑向阳 王端阳 全长乐

郑州市污水净化有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22233

[摘要] 污水处理工艺中大量使用软启动器、变频器等非线性设备,会产生大量谐波,严重威胁供电系统稳定性,低压侧大多仅通过功能有限的功率因数补偿控制器(以下简称PFC)进行控制,低压电容柜严重依赖人工现场巡检,费时费力。文章设计了一种低压补偿电容器多参量联动智能保护装置,提供一种基于单片机控制、将所采集的实时数据进行综合分析、从“偏离-速率-阈值”三个维度实现早期故障预判与精准分路切除的控制思路。仅需在电路中增加一台具有485通信功能的多路温度采集器,便可实现低成本智能化改造,实现对电容器的全方位实时监控保护。在提升厂区供配电稳定性的同时,可大幅降低人工巡视成本。

[关键词] 低压无功补偿; 电容器保护; 低成本; 智能保护; “偏离-速率-阈值”

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A

Design and Research of a Multi-Parameter Linkage Intelligent Protection Device for Low-Voltage Compensation Capacitors

Shaoli Shi Lei Hao Songkai Hou Xiangyang Zheng Duanyang Wang Changle Tong
Zhengzhou Sewage Purification Co., Ltd.

[Abstract] A large number of nonlinear devices, such as soft starters and variable-frequency drives, are widely used in wastewater treatment processes, generating substantial harmonic distortion and posing a serious threat to the stability of the power supply system. On the low-voltage side, control is mostly achieved through power factor compensation controllers (hereinafter referred to as PFCs) with limited functionality, while low-voltage capacitor cabinets rely heavily on manual on-site inspections, which are time-consuming and labor-intensive. This paper designs a multi-parameter linkage intelligent protection device for low-voltage compensation capacitors and proposes a control approach based on microcontroller control that integrates and analyzes real-time data and enables early fault prediction and precise circuit disconnection from three dimensions: deviation, rate, and threshold. By simply adding a multi-channel temperature collector with RS-485 communication to the circuit, low-cost intelligent upgrading can be achieved, enabling comprehensive real-time monitoring and protection of capacitors. While improving the stability of the plant's power supply and distribution system, the proposed solution can significantly reduce the cost of manual inspections.

[Key words] low-voltage reactive power compensation; capacitor protection; low cost; intelligent protection; “deviation-rate-threshold”

1 引言

1.1 技术背景

在污水处理工艺中,水泵、推流器、除臭风机等核心负载多采用低速多极异步电动机与变频控制方案,普遍存在功率因数偏低、谐波含量较高的问题,导致电网无功损耗显著增加。该问题对无功补偿电容器造成持续冲击,极易引发过热、鼓包甚至爆裂起火等安全隐患。

当前,低压无功补偿大多采用补偿电容器为核心的传统无源补偿,仅通过功能有限的PFC进行投切控制,如图1所示。仅能通过熔断器完成短路保护。

低压电容柜的日常巡检,严重依赖人工在现场对电容器进行测温,并通过观察外观、总电流、投切状态等来判断电容器的工作状态是否正常,工作量极大。即便如此仍无法实现对电容器异常工况的实时感知与主动保护,存在监测盲区大、响应滞后等缺陷。

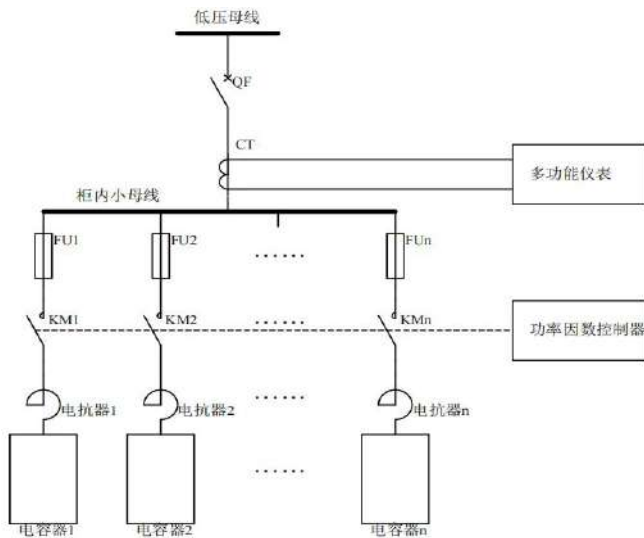


图1 传统低压补偿柜结构

本文设计的智能保护装置,提供了一种基于单片机控制,将采集到的电压、电流、温度、电容投切状态、功率因数等实时数据进行统合,并结合“动态基线偏离”“温度变化速率”“极限阈值”(以下简称“偏离—速率—阈值”)三重数据的保护策略,实现早期故障预判、精准分路切除的保护功能,且不依赖上位机程序即可独立运行。

1.2 现有技术存在的问题

传统无功补偿装置,主要存在下列问题:

- (1) 保护功能单一: 仅靠熔断器实现严重短路保护;
- (2) 保护响应滞后: 熔断器仅在短路时熔断,某一相熔断后缺相运行,无法退出;
- (3) 不具备容量衰减监测和温度实时监控;
- (4) 不具备7×24小时远程监测、预警与故障定位;

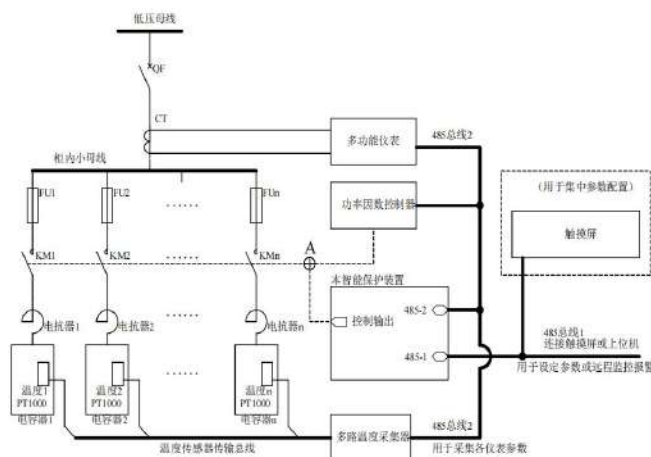


图2 改造后接线示意图

为解决以上问题,设计了一种低压补偿电容器多参量联动智能保护装置,充分利用原有设备(多功能仪表、PFC等),仅增加一台多路温度采集器,将电压、电流、功率因数、温度、电容投切状态实时传输至单片机,通过分析及计算,从“偏离—速率—

阈值”三个维度构建递进式的防护网,进而提供对电容器的全方位保护。实现故障早期预判、故障发生时及时切除隔离,并能够通过网络实时远程监控运行状态、报警动作等^[1]。

利用该智能保护装置对传统低压补偿柜的改造接线示意图如图2所示。

图2中,智能保护装置的接口有3组,2个用于485通信的接口:485-1接口用于触摸屏和上位机通信;485-2接口用于连接多功能仪表、PFC和多路温度采集器,采集运行数据。1个控制输出接口:采用继电器常闭点输出,与对应的PFC的继电器输出控制回路进行串联(图2中的A点),共同控制某一台电容接触器的通断,实现快速脱扣的保护动作。

1.3 本智能保护装置优点

(1) 利用采集到的总电流值,结合电容器的投切状态,可获得每台电容器的运行电流(无需额外为每台电容器增加电流互感器与仪表),依据计算出的电流值可判断某台电容器是否过电流、是否缺相运行、是否电流不平衡,能够切除故障电容器以实现本地保护。另外可通过计算已投入的电容器组的总容量,计算出电流阈值,实时监测总运行电流。

(2) 保护响应迅速。主控单片机内置实时运算程序,同步计算每台电容器温度瞬时变化率,叠加预设电流上限阈值、温度上限阈值,三重条件联合判定。当检测到温度突变温升同步抬升或任意参量超限,立即就地闭环切除故障电容器支路,不依赖上位机与后台网络。

(3) 实时提供电容器健康状态,做出更换建议,防止串联谐振的发生;

(4) 为每台电容器增加一个温度探头,如图2中所示温度1~温度n。通过温度采集器实时采集电容器的运行温度,利用单片机通过“偏离—速率—阈值”三重防护,实现温度异常监控;

(5) 增加通信接口,实现远程监控。485-1接口用于连接触摸屏或上位机。电容器的额定容量等参数,可通过触摸屏实现集中参数配置。若用于连接上位机,可实现远程实时监控,给运维人员提供决策。485-2接口连接多功能仪表、PFC和多路温度采集器,用于采集实施运行数据^[2]。

2 本智能保护装置的组成结构

本智能保护装置由5个部分组成,如图3所示。

2.1 电源电路

主要负责把输入的交流220V电源经过EMC滤波电路,滤除干扰,再经变压器降压与整流、稳压,提供24VDC和5VDC(即图中VCC)。

2.2 继电器驱动与指示电路

接收来自MCU的决策输出,实现将故障电容器退出运行,与此同时,可通过指示灯确定故障电容器的编号。继电器(KA)为常闭状态,在正常状态下,由PFC控制正常的投切动作,当智能保护装置发现(例如第一路)电容器故障后,断开继电器(KA1),即可把有故障的第一路电容器退出运行,同时该组故障指示灯被点亮。

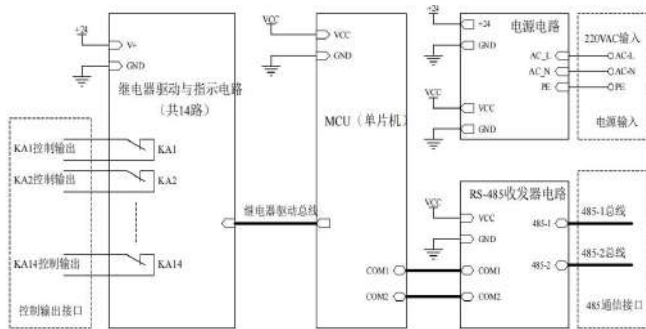


图3 智能保护装置组成结构

2.3 RS-485收发器电路

共两路485接口：一路负责连接现场的多功能仪表、PFC和多路温度采集器，采集相应的数据；一路负责连接触摸屏或者用于连接上位机，可实现参数配置和远程实时监控。通信协议采用ModBus RTU协议。

2.4 MCU电路

采用工业级单片机STC15H2K64S4构成运算核心。一方面，MCU将采集到的温度、电流、电压、每个电容器的投切状态等信息，根据“偏离—速率—阈值”三个维度的控制策略，实时判断电容器的安全状态，必要时，MCU会及时切除故障电容器并发出报警；另一方面，当需要上位机远程访问时，MCU可以实时把运行参数、故障状态等参数上传至上位机，实现远程监控。

3 本智能保护装置的保护策略

本智能保护装置，具有：基于额定值的“动态基线偏离”预判、基于“变化率”的脱扣切与报警、基于“极限阈值”作最后的脱扣保护。从“偏离—速率—阈值”三个维度构建递进式的防护网，从而提供对电容器的全方位保护。同时加入电容器容量衰减预判、电容器电流不平衡保护的功能，实现故障早期预判、及时脱扣、切除隔离，通过网络实时远程监控、预警、报警等动作。

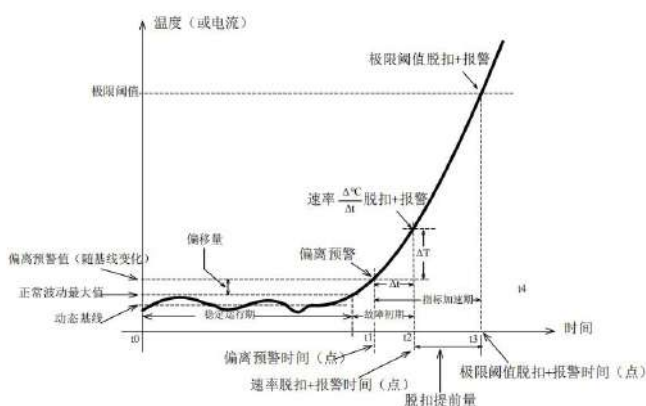


图4 “偏离—速率—阈值”保护策略示意图

3.1 动态基线偏离预警（“偏离”）

动态基线偏离预警，监控稳定运行期的偏离量。动态基线由当前电压、环境温度、实时容量加权修正，消除固定基线误报。在此动态基线基础上，确定一个正常波动最大值，再叠加一定比

例的偏移量，作为“偏离预警值”预警输出条件。如图4中 $t_0 \sim t_1$ 区间所示，当数据曲线达到最大偏离值时，对应的 t_1 时刻，输出偏离预警信号。

3.2 温度变化速率脱扣+报警（简称“速率”）

当温度超出最大偏离值（ t_1 时刻），保护方式进入温度变化速率监控保护方式，单片机采集单位时间 Δt 内的数据变化 $\Delta^\circ\text{C}$ ，换算成变化速率，与预设的脱扣速率阈值进行比较，来判断故障的严重程度。若小于脱扣速率阈值，则发出预警信息；否则，判断为严重故障，在 t_2 时刻发出脱扣动作。如图4中 $t_1 \sim t_2$ 区间所示。相比传统单一的阈值保护，实现了提前预判，避免故障进一步扩大^[3]。

3.3 “极限阈值”脱扣+报警

极限阈值保护作为最后的极限保护使用，当数据达到极限值时，立刻输出脱扣动作，使电容器迅速退出运行，并报警（图4中的 t_3 时刻）。

3.4 电容器容量衰减判断方法与控制策略

3.4.1 电容器衰减判断方法

电容器的额定容量（总容量），通过触摸屏或上位机来设置。本装置通过测量线电压与线电流，通过换算，获得实际的总容量 $C_{\text{总}}$ 。把 $C_{\text{总}}$ 与额定值进行比较，换算成衰减比例。

首先，单片机读取PFC提供的三相电压和三相电流总谐波畸变率。仅在总谐波畸变率 $\leq 15\%$ ，采集数据才算有效。

满足上述条件后，测量出三相线电压的平均值 U_L 和三相线电流的平均值 I_L ，

即可得到电容器实测总容量： $C_{\text{实测总}} = 3 \times C_{\mu F}$

电容器衰减比例 P 用下式计算：

$$\text{衰减比例: } P = \frac{C_{\text{额定总}} - C_{\text{实测总}}}{C_{\text{额定总}}} \times 100\%$$

3.4.2 控制策略

当容量衰减比例 $P < 10\%$ ，判断轻微衰减，当全部电容器投入后，功率因数仍低于设定阈值时，优先定位衰减比例最大的电容器，输出更换提示。

当 $10\% \leq P < 20\%$ ，判断为中度衰减，且功率因数能够满足设定的阈值，则输出预警信息，同时标记衰减比例，建议在下次计划检修时优先检查。

当 $P \geq 20\%$ ，判断为严重衰减，立即退出运行，并报警提示需要更换。

3.5 单台电容器电流值的采样方法及不平衡度保护策略

3.5.1 单台电容器电流值采样方法

由于本智能保护装置未针对单台电容器安装互感器和电流表（降低改造成本），所以对单台电容器的电流值的采集通过下列方法完成（该方法仅适用于电容器组逐台投切、投切过程无其他支路同时动作的场景）：

（1）电流采样方法：当装置检测到新的电容器组投入运行时，延时60ms，待电流稳定后，连续测量三次三相电流并取平均值，

作为投入后的系统总电流值;用该值减去投入前的系统总电流值,即为当前投入电容器组的三相支路电流值。

采集电流数据前,需要满足总谐波畸变率均 $\leq 15\%$,数据才算有效。

(2)根据采集到的单台电容器三相支路电流值,计算三相电流不平衡度:

$$\text{计算三相电流不平衡度: 不平衡度} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{avg}}} \times 100\%$$

其中: $I_{\max}$: 三相电流最大值; $I_{\min}$: 三相电流最小值; I_{avg} : 三相电流平均值

3.5.2 不平衡度保护控制策略

根据不平衡度的大小,执行分级保护动作:

当不平衡度 $\leq 5\%$,判定为正常运行状态。

当 $5\% < \text{不平衡度} \leq 10\%$,判定为轻度不平衡,装置发出预警信息,提示运维人员尽快检查该支路电容器的接线、容量偏差及外观状态,避免故障扩大。

当不平衡度 $> 10\%$,判定为严重不平衡,装置立即发出脱扣指令,并触发声光报警,提示运维人员立即更换故障电容器。

4 本智能保护装置的效益

4.1 经济效益

(1)利用本智能保护装置改造成本低。除本装置外,仅需安装一台多路温度采集器(配合PT1000热电阻)即可完成一面功率因数控制柜的智能化改造,单面控制柜改造约需1000元。

(2)大幅降低人力巡视成本。改造前,全厂各处分布了5个变电所16面补偿柜,采取人工每天2人3次巡视,每天需花费2小时 $\times$ 2人,每天工时4小时,全年1460工时。改造后,仅需每周现场巡视1次,每周1.2工时,全年累计63工时。按2025年工资水平,折合每个工时人力成本138元。全年可节省1397工时,折合人力成本19.2786万元。

(3)可独立运行,也可使用上位机进行远程监控(非必需),后期维护成本低。

4.2 安全效益

2024-2025年统计数据,共发生26次电容器异常发热并伴有变形,4次变形开裂故障。在传统巡检模式下,此类故障难以及时

处置,极易引发火灾等安全事故。本智能保护装置可实现全天候实时监测,在故障萌芽阶段主动切除故障电容器,有效防范事故扩大,保障设备与人员安全,提升供电系统安全水平。

在与上位机配合后,本智能保护装置与人工巡视相比,可实现远程7 $\times$ 24小时实时自动监控,自动报警,维护响应速度大幅提升,进一步提升安全水平^[4]。

5 总结

本智能保护装置具有诸多优点,如增加多种保护功能、实现7 $\times$ 24小时实时监控、采用本地保护和脱扣策略等,从“偏离一速率一阈值”三个维度对电容器故障实现提前预判和全方位保护,大幅提高了设备的安全性。能大幅降人力巡视成本,改造简单、经济。

[参考文献]

[1]张毅刚,《单片机原理与应用设计(C51 编程+Proteus 仿真)〈第四版〉》,电子工业出版社,2025。

[2]深圳国芯人工智能有限公司,《STC15H2K64S4 系列单片机原理及应用》,2025。

[3]周小方,陈育群.《STC15 单片机 C 语言项目开发》清华大学出版社,2021。

[4]王向红,叶挺.《智能供配电技术》,机械工业出版社,2023。

作者简介:

石绍利(1992--),男,汉族,河南人,本科,助理工程师,研究方向:电气工程。

郝雷(1975--),男,汉族,山东人,大专,中级工程师,研究方向:电气自动化。

侯松凯(1988--),男,汉族,河南人,大专,研究方向:电气工程。

郑向阳(1995--),男,汉族,河南人,大专,助理工程师,研究方向:电气工程。

王端阳(1995--),男,汉族,河南人,本科,中级工程师,研究方向:电气自动化。

全长乐(1995--),男,汉族,河南人,大专,助理工程师,研究方向:电气自动化。