

基于 PLC 和智能互联的变压器真空泵设计

李伯明 李和龙 朱广泽* 华晟 李庚

浙江省送变电工程有限公司 浙江杭州 310000

摘要: 变压器真空处理工艺是其绝缘性能与长期运行可靠性的关键保障。针对传统真空泵系统存在的自动化水平低、过程数据黑箱化、故障预警能力缺失及运维效能低下等问题,本文提出一种基于可编程逻辑控制器与信息物理系统架构的智能互联真空泵设计方案,构建一个多层级的控制与感知系统:以高可靠性 PLC 为本地控制核心,执行基于过程变量反馈的精确序贯控制;通过集成多模态传感器网络,实现设备运行状态的全面感知;借助物联网网关技术,建立设备与云平台间的安全数据通道,从而实现状态信息的远程可视化与深度挖掘。实践应用表明,相较于传统系统,本设计将抽真空过程的平均无故障工作时间提升了约 47%,并通过实时监测真空度变化率 dP/dt 实现了对微泄漏的早期诊断。该系统为实现变压器制造与检修过程的数字化与智能化转型提供了具备高可行性的技术范式。

关键词: 可编程逻辑控制器;信息物理系统;动态建模;可靠性分析

引言

在电力能源传输与分配网络中,电力变压器作为核心枢纽设备,其内在绝缘介质的完好性直接决定了整个电网的稳态运行水平与寿命周期。真空处理可以彻底排除变压器器身绝缘结构内部残留的水分与气体,是提升其绝缘强度、局部放电起始电压及延缓纤维素材料老化速率的核心工艺环节。该工艺过程的完备性与控制精度对变压器的终极性能表现具有决定性影响^[1-3]。

然而,当前广泛部署于工业现场的多数真空处理装备,其控制系统仍旧基于传统的继电器逻辑或基础仪表回路之上。此类系统呈现出显著的局限性:

其一,控制过程的自动化与自适应能力匮乏,其启停、阀门切换与终点判断高度依赖操作人员的经验;其二,系统作为一个典型的黑箱,其关键过程参数的时序数据缺乏有效的采集与记录机制,致使工艺质量追溯与深度分析缺乏数据根基;其三,运维模式属于被动响应式,仅在设备发生硬性故障时方能触发维护动作,缺乏基于性能衰退预测的主动性维护策略,这不仅潜藏着因非计划停机导致的重大工期延误风险,更可能因真空度不达标而引发变压器受潮等灾难性质量缺陷。

为解决上述工程难题,本文将先进控制理论与工业物联网技术相融合,旨在构建一个集精准控制、状态感知与智能运维于一体的新一代真空泵系统^[4,5]。本研究以可编程逻辑

控制器作为本地计算与控制核心,确保基础控制环路的确定性与高可靠性;同时,引入信息物理系统的设计范式,通过部署传感器网络与物联网通信网关,构建了真空泵设备的数字孪生体,实现了物理实体与虚拟模型间的双向映射与数据闭环。

1 系统总体架构与信息物理系统设计

本文所提出的智能真空泵系统,其设计范式源于信息物理系统理论,旨在通过计算进程与物理过程的深度集成与协作,实现对真空处理这一连续物理过程的精确感知、动态控制与信息赋能。系统架构遵循层次化与模块化原则,构建了一个由物理层、控制层、网络层与信息层组成的四层闭环系统。

系统的数学化描述可视为一个多层反馈控制系统。设系统的整体功能输出为 Y ,它由各层级的联合作用所决定:

$$Y = F(I, C, N, A)$$

其中, F 为系统的整体传递函数, I 为物理层输入, C 为控制层策略, N 为网络层传输特性, A 为应用层算法。

(1) 物理层: 此层构成了系统的被控对象与感知前端,是能量流与物质流的交汇点。其动态特性可由一组微分方程描述,该层的状态向量 $x_p(t)$ 可定义为:

$$x_p(t) = [P(t), T(t), I_m(t), L(t)]^T$$

其中, $P(t)$ 为腔体绝对压力, $T(t)$ 为泵体温度, $I_m(t)$ 为电机电流, $L(t)$ 为油位高度。通过部署高精度电容薄膜规、

PT100 温度传感器及霍尔效应电流传感器,实现对状态向量的实时观测 $\hat{\mathbf{x}}_p(t)$ 。

(2) 控制层:本层以 PLC 为核心,充当系统的局部决策器。它接收物理层的状态观测值 $\mathbf{x}_p(t)$,并执行预设的控制律 $\hat{\mathbf{x}}_p(t)$,其中 $\mathbf{u}(t)$ 为控制输出向量, $\mathbf{r}(t)$ 为给定输入目标真空度和保压时间。PLC 通过求解如下最优控制问题,确保系统稳定、精确地跟踪工艺曲线:

$$\min_{\mathbf{u}} \int_0^{t_f} [\mathbf{e}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt$$

其中, $\mathbf{e}(t) = \mathbf{r}(t) - \hat{\mathbf{x}}_p(t)$ 为误差向量, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为权重矩阵。

(3) 网络层:此层负责控制层与信息层之间的数据交换。系统采用工业物联网网关,实现数据 $\hat{\mathbf{x}}_p(t)$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 的远程传输,可用通信可靠度 R_{comm} 来衡量有效性,并假设其在给定时间内服从指数分布:

$$R_{comm}(t) = e^{-\lambda t}$$

其中, λ 为通信信道的失效率。

(4) 信息层:该层部署于云平台,是系统的全局优化与决策中心。它接收并存储来自网络层的历史数据,利用大数据分析、数字孪生模型及机器学习算法,实现设备健康评估、剩余使用寿命预测及能效优化等功能。

1.1 系统可靠性建模

基于上述架构,系统的整体可靠性 R_{system} 可建模为各层级可靠性的串联模型,并考虑其关键部件的冗余设计:

$$R_{system}(t) = R_{PLC}(t) \cdot \prod_{i=1}^n R_{sensor_i}(t) \cdot R_{comm}(t) \cdot R_{cloud}(t)$$

2 关键硬件配置与控制系统建模

2.1 核心控制器与传感系统配置

控制器的选型直接决定了系统控制律 \mathbf{K} 的实现复杂度与精度。选用具备强浮点运算能力与确定时延特性的模块化 PLC。其 I/O 系统配置需满足以下映射关系:

模拟量输入 (AI): $\mathbf{AI}_j(t) = k_j \cdot x_{p,j}(t) + b_j$, 其中 k_j 为传感器变比系数, b_j 为零点偏移。例如,对于电容薄膜规,其输出 $\mathbf{AI}_p(t)$ 与真空度 $P(t)$ 的关系在其量程内近似线性。

数字量输出 (DO): 用于驱动执行机构,其指令 $\mathbf{u}_k(t)$ 为布尔量,控制电磁阀、接触器等。

真空测量采用压阻计 (最大量程 1×10^{-2} mbar) 与电容薄膜计 (量程 $1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-4}$ mbar) 的组合,以覆盖整个抽气过程的动态范围。电机电流 $\mathbf{I}_m(t)$ 的监测不仅用于过载保

护,其有效值 \mathbf{I}_{RMS} 更可作为泵负载特性的间接观测器,用于故障诊断。

2.2 执行机构与驱动系统

执行机构是控制输出 $\mathbf{u}(t)$ 的物理实现。主泵电机由变频器驱动,其输出频率 f_{out} 是 PLC 模拟量输出 \mathbf{AO}_{freq} 的函数:

$$f_{out} = g(\mathbf{AO}_{freq})$$

通过控制 f_{out} , 不仅实现了电机的软启停,降低了启动冲击电流,更重要的是可以在高压阶段通过降频运行来降低功耗,实现能效优化。气路通断则由常闭型电磁阀控制,其响应时间 τ_{valve} 是评估系统动态性能的关键指标之一。

2.3 控制算法与状态机设计

PLC 内部的程序是实现智能化自动控制的核心。设计一个基于有限状态机的序贯控制系统,其状态集合:

$$S = \{\text{Idle}, \text{Initializing}, \text{Pumping}, \text{Holding}, \text{Fault}, \text{Shutdown}\}$$

状态转移由事件 E 和守卫条件 G 触发,其逻辑可形式化地描述为:

$$S_{next} = \delta(S_{current}, E, G)$$

例如,从 'Pumping' 状态转移到 'Holding' 状态的事件是 $E: P(t) \leq P_{set}$, 守卫条件是 $G: \frac{dP}{dt} \approx 0$ 。

在 'Pumping' 状态下,核心控制算法是监测真空度曲线并智能判断系统状态。我们通过实时计算真空度的对数微分来评估抽气效率:

$$\frac{d(\ln P)}{dt} \approx \frac{\ln P(t) - \ln P(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

该值的异常变化可用于早期识别真空泄漏或泵性能衰退。此外,系统内置了基于模型的故障诊断算法。通过建立泵组在健康状态下的参考电流-真空度曲线 $\mathbf{I}_{m,ref}(P)$, 实时监测的电流偏差 $\Delta \mathbf{I}_m = |\mathbf{I}_m(t) - \mathbf{I}_{m,ref}(P(t))|$ 若超过阈值 $\Delta \mathbf{I}_{max}$, 则触发预警,表明可能存在机械摩擦增大或轴承磨损等潜在故障。

3 智能互联功能实现与信息层数据分析

3.1 数据采集与云端汇聚

在网络层,物联网网关以固定采样周期从 PLC 轮询数据,构成一个多维时间序列数据集 $\mathbf{D}(t)$:

$$\mathbf{D}(t) = \{\mathbf{s}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{e}(t)\}$$

其中, $\mathbf{s}(t) = [P(t), T(t), \mathbf{I}_m(t), \dots]^T$ 为状态向量, $\mathbf{a}(t) = [f_{out}(t), V_{status}(t), \dots]^T$ 为执行器动作向量, $\mathbf{e}(t)$ 为系统事件向量 (报警、状态切换)。该数据集经由 MQTT 协议上传至云平台,并进

行时序数据库存储,为后续分析提供数据基础。

3.2 基于数据的设备健康状态评估

为实现预测性维护,我们构建了一个基于多参数融合的设备健康指数 HI。该指数是一个归一化的标量,用于量化真空泵的性能衰退程度。其计算模型如下:

$$HI(t) = 1 - \omega_1 \cdot \frac{\tau_a(t) - \tau_{a,new}}{\tau_{a,max} - \tau_{a,new}} - \omega_2 \cdot \frac{I_{m,avg}(t) - I_{m,new}}{I_{m,max} - I_{m,new}} - \omega_3 \cdot \Delta P_{leak}(t)$$

其中 $\tau_a(t)$ 为当前系统从大气压抽至目标真空度所需的时间,是泵体抽气效率的直接体现; $I_{m,avg}(t)$ 为在标准工况下的平均运行电流; $\Delta P_{leak}(t)$ 为保压测试期间的压升率; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为各参数的权重系数,满足 $\sum \omega_i = 1$ 。

当 $HI(t)$ 低于预设阈值时,系统自动生成维护工单,提示进行油品更换或机械检查。

3.3 真空泄漏的智能诊断算法

保压阶段的压升率 $\frac{dP}{dt}$ 是判断系统密封性的关键指标。我们采用基于统计过程控制的方法进行泄漏诊断。在无泄漏理想状态下, $\frac{dP}{dt}$ 应趋于零并服从一个均值为零的正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。我们设置控制上限 (UCL) 为:

$$UCL = z_{\alpha/2} \cdot \sigma$$

其中为标准正态分布的分位数。当连续多个时间点的 $\frac{dP}{dt}$ 观测值超过 UCL, 且其样本均值 \bar{p} 显著大于零 (t 检验, $p\text{-value} < 0.05$) 时, 则判定存在统计显著的泄漏, 触发泄漏报警。该算法有效避免了因传感器噪声导致的误报。

4 应用效益分析与未来展望

为验证本设计的工程价值与经济性,我们在绍兴某 500kV 变电站主变扩建工程进行了现场试运行并完成了数据采集,与传统真空泵系统进行了对比分析:

(1) 效率与质量提升: 实现全自动序贯控制,避免了人为操作延迟与失误,平均抽真空周期时间缩短了约 18%。同时,因过程参数被严格控制在最优区间,变压器绝缘受潮返工率为零。

(2) 可靠性提升与维护成本下降: 基于 $HI(t)$ 的预测性维护策略,将非计划停机事件减少了 90% 以上。维护模式从固定的时间周期维护转变为按需维护,使得平均维护间隔延长了 35%,备件与人力成本显著降低。系统的平均无故障工作时间 (MTBF) 由传统系统的约 1200 小时提升至约 1760 小时,提升率达 47%。

(3) 能耗优化: 通过变频器在抽气初期的大流量需求阶段进行降频运行,系统综合能耗降低了约 12%。

综上所述,本文成功设计并实现了一套基于 PLC 与智能互联技术的变压器真空泵系统。该系统通过分层级的信息物理系统架构,将高可靠性的本地自动控制与云端的数据智能分析相结合,不仅精准地完成了真空处理的物理过程,更赋予了其状态感知、故障预测与工艺优化的信息能力。应用实践表明,本系统在效率、可靠性、能耗与管理模式上均实现了显著提升,为解决传统工业设备数字化、智能化转型的共性难题提供了一个行之有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 徐法俭,刘继睿,潘成新,等. 油气回收真空泵压缩机性能智能测试系统研究及工程应用 [J/OL]. 真空科学与技术学报, 1-9[2025-11-28]. <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202507012>.
- [2] 吴西博,林江,张继丞,等. 真空泵脱气性能对油色谱监测装置的影响研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2025, (04): 108-113.
- [3] 李振国. 台山核电站 500kV 主变压器施工安装要点探讨 [J]. 电力设备管理, 2025, (15): 208-210.[4] 邹洪武,贺成杰,郭成虎,等. 基于智能优化的模糊 PID 冻干机真空控制系统的研究 [J/OL]. 真空, 1-8[2025-11-28]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1174.TB.20250728.1351.002>.
- [5] 王普. 基于节能与优化策略的真空泵控制系统研发 [J]. 机电信息, 2025, (09): 33-36.