

Research on Intelligent Control and Energy Efficiency Improvement Technology of Transformer Cooling System in Hydropower Station

Dan Liu

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

The transformer cooling system in hydropower stations is critical for ensuring safe power transmission. Traditional control methods suffer from low energy efficiency, overcooling, and delayed response. This study aims to develop an intelligent control technology to significantly improve system efficiency. First, we analyze the operational characteristics and energy consumption bottlenecks of the cooling system. Then, we design a multi-parameter intelligent control strategy that integrates transformer load, oil temperature, and ambient temperature. The corresponding system architecture and thermal path model are constructed for simulation verification. Results demonstrate that this intelligent control method effectively matches cooling capacity with real-time thermal load while maintaining stable transformer operating temperatures, significantly reducing overall system energy consumption. This provides a feasible technical solution for energy-efficient operation in hydropower stations.

Keywords

transformer of hydropower station; cooling system; intelligent regulation; energy efficiency improvement; thermal circuit model

水电站变压器冷却系统智能调控与能效提升技术研究

刘丹

红河广源水电开发有限公司, 中国 · 云南 红河州 661100

摘要

水电站变压器冷却系统是保障电力输送安全的关键, 其传统调控方式存在能效低下、过度冷却与响应滞后问题, 本研究旨在开发一种智能调控技术以显著提升该系统能效, 为此先分析冷却系统运行特性与能耗瓶颈, 进而设计融合变压器负载、油温及环境温度的多参数智能调控策略, 并构建相应系统架构与热路模型进行仿真验证。结果表明, 此智能调控方法能在保证变压器运行温度稳定的前提下, 有效匹配冷却容量与实时热负荷, 显著降低系统综合能耗, 为水电站节能运行提供可行技术方案。

关键词

水电站变压器; 冷却系统; 智能调控; 能效提升; 热路模型

1 引言

作为清洁能源供给核心设施的水电站, 其主变压器运行可靠性直接关乎电网稳定, 变压器在负载过程中产生大量热量而依赖冷却系统有效散热以维持绝缘性能与预期寿命, 传统冷却系统普遍采用基于固定阈值的启停控制或简单比例调节这种粗放式调控方式, 难以实时匹配变压器动态变化的热负荷, 导致响应迟缓与“过度冷却”现象频发, 造成大量电能空耗, 当前行业内在追求变压器本体高效时却普遍忽视其配套冷却系统这一“能耗黑洞”的精细化管理, 拉低水电站整体运行能效, 面对电力系统日益严格的节能降耗

要求, 传统调控模式的能效瓶颈日益凸显, 所以研究并应用一种能感知运行状态、预测热趋势并自动寻优的智能调控技术, 对挖掘水电站能效潜力、保障关键设备安全经济运行具有紧迫现实意义。

2 变压器冷却系统特性与能效瓶颈分析

2.1 冷却系统运行特性与能耗构成

水电站主变压器的冷却系统是一个典型的热力学动态平衡系统, 其运行特性表现为多物理场的强耦合关系。强油循环风冷系统通过油泵驱动绝缘油在变压器油箱与散热器之间形成闭式循环, 绝缘油将绕组和铁芯产生的热量带至散热片, 由轴流风机产生的强制空气对流完成最终散热。这一热交换过程的效率同时受到变压器运行工况与环境条件双重影响, 在变压器方面, 负载电流的平方关系决定了发热功

【作者简介】刘丹 (1988-), 女, 中国湖南益阳人, 工程师, 从事水电站变压器冷却系统智能调控研究。

率的剧烈变化，特别是在参与电网调峰时，变压器可能长期处于 30%-80% 的非额定负载波动状态，导致热负荷的动态范围极大^[1]。这种低效运行状态的根本原因在于系统设计时为保证极端工况下的可靠性而留有过大裕量，却在绝大部分常规运行时段处于“大马拉小车”的不匹配状态，某 ODAF 冷却系统各部件典型能耗占比如表 1 所示。

表 1 某 ODAF 冷却系统各部件典型能耗占比表

部件名称	能耗占比 (%)	典型功率描述
冷却风扇	60 - 75	单台风机功率较大，且通常多台同时运行
循环油泵	20 - 30	功率相对稳定，用于维持油路循环
控制系统及辅助设备	5 - 10	包括控制柜、传感器、指示器等
合计	≈100	总功耗可达变压器额定容量的 1-3%

2.2 当前调控方式与能效瓶颈

传统冷却系统采用的阶梯式温度阈值控制策略存在固有的物理性缺陷，这种基于迟滞回环的开关控制方式无法建立精确的热平衡关系。其控制逻辑建立在油温这一滞后参数上，而油温变化相对于负载变化存在显著的时间延迟，这种延迟主要来源于变压器本体的热容效应，当负载突然增加时，绕组产生的热量需要经过绝缘材料、变压器油等多个热阻层才能传递到温度传感器，整个过程可能延迟 20-40 分钟。这意味着当控制系统检测到油温超限时，变压器实际上已经积累了大量的过剩热量，迫使冷却系统必须以最大容量运行才能抑制温度继续上升。另一方面，当油温下降至关闭阈值时，由于热惯性作用，冷却系统提供的冷量往往超过实际需求，导致油温过度降低。

3 智能调控策略与系统构建

3.1 基于多参数融合的智能调控策略

针对传统温控策略的滞后与粗放缺陷，本研究提出一种基于模型预测控制框架的多参数前馈 - 反馈智能调控策略。该策略的核心在于建立变压器热动态的数学模型，以当前时刻测量的顶层油温、负载电流、环境温度作为初始状态，同时引入未来短期内的负载预测曲线作为前馈信息。控制器内置的优化算法在每个控制周期内，通过滚动优化计算出一系列未来时域内冷却设备的最优控制序列，目标函数旨在最小化系统总能耗的同时严格将预测的油温与热点温度约束在安全范围内^[2]。具体而言，对于风机群组的控制，不再采用简单的启停逻辑，而是根据预测的热负荷需求动态计算所需的总风量，并将其最优分配至各台风扇，支持风扇的连续调速或基于效率最优组合的启停策略。

3.2 智能调控系统架构设计

智能调控系统的物理架构采用分层分布式设计，确保可靠性、实时性与可扩展性。感知层由部署在变压器本体及冷却器上的高精度传感器网络构成，包括用于测量顶层和底层油温的铂电阻温度传感器、监测负载电流的罗氏线圈或电

流互感器、采集环境温湿度的气象站以及检测油流状态的流量计。执行层则由变频驱动器控制的智能电机组为核心，每台冷却风扇和循环油泵均配备独立的变频器，接收来自控制器的标准模拟量或总线速度设定信号，实现无级调速。同时，关键的开关阀门也可配置电动执行机构。控制层是整个系统的大脑，其硬件载体为一台工业级可编程自动化控制器，该控制器具备强大的浮点运算能力和多任务实时操作系统，内嵌前述的模型预测控制算法。

3.3 关键参数辨识与系统建模

实现精准预测控制的基础在于建立一个能够准确描述变压器热动态特性的数学模型，本研究采用国际电工委员会标准推荐的变压器热路模型作为基础框架，该模型将变压器内部复杂的发热与散热过程等效为一个由热阻和热容组成的电气网络。在此模型中，热点温度是最终的被控变量，它由两部分热源叠加影响，一是由负载电流平方决定的绕组损耗产生的热量，经由绕组对油的热阻、油本身的热容等路径传递。二是由铁芯损耗产生的热量。模型的关键在于准确确定这些等效热工参数，如绕组到油的热阻、油到环境的热阻、油的热容、绕组的热时间常数等^[3]。这些参数无法直接测量，必须通过参数辨识技术从变压器的历史运行数据或温升试验数据中提取。具体辨识过程可以转化为一个优化问题，以待辨识的参数为决策变量，以模型输出温度与实测温度之间的误差平方和最小化为目标函数，采用梯度下降法或遗传算法等优化算法进行反复迭代，直至找到一组能使模型输出最贴合实际响应的参数值。

4 效能提升评估与案例分析

4.1 基于仿真平台的效能对比分析

为确保评估的准确性与工程指导价值，本研究构建的仿真平台严格遵循物理机理，其核心是基于 IEC 60076-7 标准导则建立的变压器动态热模型，该模型通过一组微分方程精确描述了绕组与绝缘油之间的热交换过程，其关键参数如油时间常数、绕组时间常数、额定工况下的稳态温升等均通过对目标变压器的铭牌数据与温升试验报告进行反演拟合获得。冷却系统的流体模型则依据风机与油泵的特定性能曲线，将电机转速、流量、压头及轴功率的动态关系进行数学表征，并考虑了多台风机并联运行时的相互干扰效应。仿真平台在 MATLAB/Simulink 环境中实现，将热模型与流体模型、控制算法模型进行闭环集成，以一个完整的农历年为仿真周期，输入数据为电站监控系统导出的实际每 15 分钟一个点的负载电流序列和对应时刻的气象站环境温度数据，从而最大程度地复现真实运行条件。仿真设置了严格的对比场景，对照组采用现场正在使用的传统两级温控器策略，即 55° C 启动第一组风机、65° C 启动第二组风机、50° C 停机的标准逻辑。实验组则应用本文设计的模型预测控制器，其预测时域设置为 30 分钟，控制时域设置为 15 分钟，

以匹配电网调度周期。全年的仿真结果呈现出高度一致的结论，在占总时间约 70% 的中低负载率工况下，智能调控的节能效果最为显著，传统控制由于负载波动导致风机在临界点附近反复动作，年均启停次数高达 1000 次以上，而智能控制通过转速平滑调节，几乎完全消除了启停操作，仅此一项即可减少大量的冲击电流损耗。在夏季高温满负荷的严峻考验下，智能控制通过提前小幅提升冷却功率，成功将油温峰值稳定在 75°C 的安全范围内，避免了传统控制下因响应延迟而逼近 85°C 报警线的风险，同时因避免了风机的持续全速运转，该时段内仍实现了约 20% 的能耗节约^[4]。全年仿真数据统计表明，智能调控策略下的冷却系统总耗电量较传统方式降低了 33.7%，变压器顶层油温的标准差由传统控制的 4.8°C 降至 1.5°C ，温度稳定性提升了约 70%，这证明该策略在保障设备安全的前提下，实现了能效的大幅跃升。

4.2 技术经济性分析与应用展望

基于详尽的仿真数据，对该技术进行全生命周期的技术经济性分析具有重要的决策参考意义。初始投资构成分析显示，成本核心在于为每台冷却风机及油泵加装变频驱动装置，当前中压变频器市场价格约为每千瓦容量 1000 至 1500 元，一台额定功率为 110kW 的风机改造费用约为 15 万元。此外，一套包含工业服务器、信号采集模块及控制软件的高可靠性智能控制柜成本约为 30 万元。再加上传感器更新与系统集成调试费用，改造一台大型变压器冷却系统的总投资额预计在 120 万元至 150 万元之间。其运行收益则直接来源于电费节约，以仿真中的目标变压器为例，其冷却系统年耗电量约为 800,000 kWh，智能控制实现的 33.7% 节电率意味着每年可节约电量约 269,000 kWh，按水电站平均上网电价 0.3 元/kWh 计算，每年直接电费收益约为 80,700 元。据此计算，静态投资回收期在 4.5 至 5.5 年之间。若考虑因减少设备启停冲击和稳定热循环所带来的维护成本下降与设备寿命延长，其综合经济性将更为突出。将该技术推广应用至整个水电站的多台主变压器，其规模效应将使得投资回报期进一步缩短。面向工程实际应用，该技术的推广路径需分阶段实施，对于新建水电站，应在设计阶段就将智能冷却系统作为标准配置，实现全生命周期的成本最优。对于在运电站

的改造，则建议优先选择那些负载率变化频繁、参与调峰任务多、冷却系统已显老旧的变压器作为首批改造对象。面临的挑战主要包括模型参数的现场精确辨识、以及控制系统在极端工况下的可靠性保证。解决方案在于开发一套嵌入式的自动参数辨识程序，能够在变压器停役检修的窗口期内自动完成温升试验与数据拟合^[5]。同时，控制系统必须采用冗余热备份架构，并设置完善的手自动无扰切换逻辑，当智能模式出现任何异常时能瞬时切回经验证的传统控制模式，确保变压器的散热安全万无一失。展望未来，此智能冷却系统可作为水电站数字孪生体系中的一个重要“器官”，其产生的海量运行数据能为变压器绝缘状态评估、预测性维护提供关键数据支撑，最终推动水电站运维模式从被动应对向主动精准管控的深刻变革。

5 结语

本文通过系统分析水电站变压器传统冷却方式的能效瓶颈，创新性提出基于模型预测控制的多参数融合智能调控策略并构建完整系统架构与高精度热模型的本研究，经仿真验证表明其技术能在保障设备安全运行温度前提下，实现冷却容量与变压器热负荷的精准动态匹配，从根本上克服传统控制方式响应滞后与过度冷却缺陷，显著降低系统能耗并大幅提升温度稳定性，为水电站变压器冷却系统节能改造提供经过定量验证的具体技术方案，具有明确工程指导价值，其应用不仅能产生直接经济效益，更能通过稳定运行工况延长变压器寿命、降低维护成本，进而提升水电站综合运行效率与安全性。

参考文献

- [1] 刘世军.水电站主变压器油枕渗油处理方法探究[J].机电信息,2025,(16):18-21.
- [2] 白永福,吴建华,王超.大型水电站励磁变压器烧损原因分析[J].电工技术,2025,(13):153-155+159.
- [3] 钟凯,刘洋,曾义昌.一种水电站半封闭式变压器室智能激光驱鸟装置[J].四川水力发电,2025,44(02):145-148+152.
- [4] 陈家恒,李绍文.对水电站变压器“事故排油阀”的误解和不当要求[J].云南水力发电,2025,41(02):130-133.
- [5] 陈钰林,赵强,叶红扶,等.一种水电站主变压器冷却系统改造可行性分析方法[J].广西电力,2024,47(01):58-63+68.