

基于电流监测的齿轮箱冷却电机故障预警系统开发

杨宜明

大唐云南发电有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 风电齿轮箱冷却系统频繁出现电机故障引发的高温限功率问题,影响设备稳定运行。文章研究了冷却电机运行特征与电流信号变化规律,分析了基于电流监测的硬件结构与数据处理方法,构建了集实时分析、阈值判断与报警联动为一体的预警系统,最后探讨了在实际风电场应用中的识别效果与误报率控制机制。研究成果可显著提升风电机组冷却系统故障识别效率,降低异常停机风险,具有工程推广价值。

关键词: 齿轮箱冷却系统; 电机故障; 电流监测

引言

风电机组长期运行中齿轮箱冷却系统频繁出现油温升高和电机异常,直接影响主控系统功率调节与整机运行稳定性,冷却电机故障难以实时识别成为限制系统可靠性的关键因素。针对风电场齿轮箱散热效率低、故障预警滞后的现状,本研究基于电流信号实时变化特性构建冷却电机故障预警系统,提出以电流波动趋势为判断依据的监测与联动控制策略,设计集成式分析与报警模块,形成闭环响应机制。文章从运行特征、电流监测、电机状态识别与系统验证四方面展开技术研究,为提升风电设备智能运维水平提供可实施的工程方案。

1 冷却电机运行特征分析

齿轮箱冷却系统中配置的油冷风扇电机额定功率为4/1.6kW,运行转速为1440/940r/min,采用铝合金机壳与H级绝缘结构,防护等级为IP55,具备高频启停与高温工况下的运行特性。冷却电机运行负载受油温变化与风扇阻力影响显著,在风量不足或散热器堵塞时,电机负载端轴功率升高,电流信号出现持续上浮现象。经现场实测,原风扇风量为8500m³/h,电机工作电流在1.6A至3.2A之间波动,叶片更换后风量提高至17500m³/h,运行电流上升至4.1A左右,表明在风阻不变前提下风量增加显著改变电机电流响应。电机故障时通常伴随相电流不平衡、幅值突升或持续高电流输出,结合润滑系统中泵阻异常或渗漏引起的附加负载变化,电机电流信号具备表征运行状态的敏感性与识别价值。

2 电流监测模块设计

2.1 电流采集装置的硬件结构

冷却电机电流采集装置运用高灵敏度霍尔电流传感器,额定测量范围覆盖0~10A,具备抗干扰和线性响应性能,输出信号为标准模拟电压信号,经由24V工业级隔离型A/D模块输入至PLC主控站,采集频率与响应精度满

足风机运行动态工况要求^[1]。为避免电磁干扰影响采集精度,信号线缆采用屏蔽双绞结构,接地采用单点接地原则,采集单元安装于电机控制柜内部独立隔热腔体内,具备IP65防护等级。系统电源由风机低压控制系统统一供电,并加装稳压滤波模块以抑制电网纹波干扰,保障长周期运行下数据采集的稳定性与可靠性。每个采集通道配置相应的电机编码标识与时间戳字段,便于后续故障数据追溯与信号完整性验证。

2.2 数据滤波与采样频率设置

冷却电机电流信号中存在较大启动电流波动与外部干扰脉冲,为提取有效特征信号,监测系统设置50Hz工作频率的同步采样机制,结合三阶巴特沃斯低通滤波算法进行实时数据平滑处理^[2]。滤波窗口宽度根据电机转速与风量响应周期设定为0.4秒,滤除短时突变噪声且保留持续异常信号。在冷机启动阶段采用启动识别延迟机制屏蔽前2秒非稳态电流,确保分析数据处于稳定负载工况。异常波动识别模块采用滑动均值差分算法,动态跟踪电流变化趋势并判断振幅偏移速率,在数据缓存中保留最近60秒连续原始与处理后信号,支持报警前历史轨迹回溯。

2.3 关键参数判别阈值设定方法

电流阈值设定以实际齿轮箱散热系统工况为依据,参考冷却电机在风量8500m³/h与17500m³/h条件下的电流负载数据,结合设备电气参数设定基准运行区间为1.5A~4.2A。在风扇叶片更换、油温提升、滤网堵塞等场景下,电机电流均存在可识别的持续偏移特征,预警系统将偏移幅度大于额定值±15%、持续时间超过10秒视为一级预警,若电流突破±30%则触发二级报警并联动风机主控下发功率限制指令。判别模型中加入温度补偿系数,结合环境温度与齿轮箱油温数据修正电流阈值曲线,提升高温条件下的识别准确率。系统支持自学习模

式更新电流基准数据,适应不同季节与负载变化,维持报警判据稳定。

3 预警系统功能开发与集成

3.1 电机运行状态实时分析算法

冷却电机在齿轮箱油温波动、风阻变化及内部机械磨损等工况下,其负载电流呈现非线性响应,传统基于阈值判定的监测方式无法有效识别运行中的细微异常波动^[3]。为实现高频运行状态下的实时故障预警,算法采用滑动窗口分析机制对冷却电机电流信号进行连续计算,通过时间序列内局部均值、变动幅度及偏移趋势进行状态判别。系统将电流信号以每0.2秒为间隔分段采样,建立5秒周期的滑动窗口,并在当前窗口与前一窗口之间构建均值差分模型:

$$\Delta I = \frac{\bar{I}_t - \bar{I}_{t-1}}{\bar{I}_{t-1}} \times 100\%$$

其中, \bar{I}_t 为当前滑动窗口的电流平均值, \bar{I}_{t-1} 为上一滑动窗口的电流平均值, ΔI 为相对变化率,若 ΔI 连续三个滑动周期均超过15%,判断电机处于非稳态负载区间。为了增强对突变型高电流的响应灵敏度,引入标准差评价指标:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I}_t)^2}$$

其中, σ_t 为当前滑动窗口内电流波动标准差,N为采样点数, I_i 为第*i*个采样点电流值。若 σ_t 超过0.5A并维持三个周期以上,标识为电机震荡运行状态。系统综合考虑 ΔI 和 σ_t 两项指标进行联合判别,避免单一参数产生误判,同时记录突变方向与幅度特征,用于后续报警等级匹配与联动控制逻辑判断。状态识别模块与报警触发逻辑采用数据缓存区共享机制,确保实时性与一致性处理精度,在风机运行周期内保持连续状态分析不中断。

3.2 预警逻辑触发条件设定

齿轮箱冷却电机在风阻增大、叶片失衡、油压偏移及电机端温升异常等工况下,其运行电流会产生连续性漂移与周期性大幅震荡,需建立适配现场工况的复合预警触发模型以保证响应有效性^[4]。系统采用多因子并联结构构建三重逻辑条件,核心变量为当前运行电流值 I_t 、滑动窗口变化率 ΔI 与窗口内电流波动幅度 σ_t 。一级预警设定为电流偏离历史基准值15%并持续10秒以上;二级预警为偏移超过30%、持续大于30秒;三级预警针对大幅震荡状态,即电流标准差 σ_t 超过0.5A并持续3轮采样周期以上。模型引入动态参数调节功能,在不同季节温度环境下对比齿轮箱油温与风冷系统入口风速值设定补偿因子,使报警门限曲线随环境变量变化动态调整,提升模型的现

场适应性。在热膨胀引起的电机阻力变化明显时,电流上升趋势结合流量下降率提供附加触发逻辑,避免叶片损坏或风道堵塞情形下误为正常负载升高。

预警模块数据来自电机本体采集回路与风冷系统运行参数双通道输入,经中间件转换后以双冗余模式输入边缘控制单元并缓存至本地状态判断单元。系统设置报警触发锁定机制,每次报警响应事件需满足连续判断周期内逻辑条件恒成立,锁定状态将保留至用户手动复位或系统检测到稳定运行超过180秒。报警事件编号与风机运行参数、润滑系统温度及冷却器出风量建立同步记录机制,形成带时间戳的多源数据组,用于后端诊断平台故障复现与算法训练。系统逻辑结构中设置抑制类判别环节,例如运行初期延迟识别模块与振动误触发抑制模块,减少启动瞬间电流冲击和风叶扰动带来的干扰。不同预警等级联动不同等级报警输出接口,低等级预警发出提示信号,高等级预警直接触发保护机制进入功率限制或冷却系统强制停止策略。

3.3 报警输出与风机主控系统联动方式

报警模块采用RS485通信接口与风机主控系统通信,协议标准选用ModbusRTU格式,数据帧周期为1秒,信息内容包括当前报警等级、事件编码、实时电流值、电流变化率、震荡幅度、风机编号及报警发生时间^[5]。系统报警信号结构中,每一个报警事件对应8字节固定数据帧,包含状态位标识与报警源地址字段,便于主控系统识别来源与类型。报警等级与事件类型在SCADA系统中实时映射为运行参数显示,在报警等级达到一级以上时,触发主控逻辑模块中预设的冷却降功率程序,使主控系统在检测冷却异常前完成风机控制响应。对于达到二级或三级报警的故障状态,报警模块将发出继电器硬接点信号,直连冷却电机断电控制回路,形成电气级强制停机控制路径,保证极端故障情形下系统响应闭环不依赖上位指令响应延迟。

报警系统配置状态保持寄存器,记录最近10次报警状态,包括报警电流值、持续时长、滑动波动数据、判别分级与系统响应结果,用于风电场后台运维端进行事故复现分析。每次报警后自动生成状态报告包上传至远程控制服务器,并同步写入风机本地运行日志,报警事件通过时间戳与SCADA系统内风速、电网电压、润滑油温、冷却风速等变量数据自动关联分析,供故障追溯使用。报警系统具备自检功能,在电流信号采集通道断线、电源异常或信号幅值漂移超标时发出系统内部报警,确保故障状态下主控系统仍能获得报警提示。各风机冷却电机报警模块具备唯一ID编码,在并网平台中可

实现单机级监控、组群级统计、场站级故障汇总，并通过远程指令调整预警参数、刷新算法模型与上传运行日志，实现数据闭环与控制链路协同。

4 现场验证与运行效果分析

4.1 风电场现场数据采集与比对

风电场齿轮箱冷却系统改造过程中，对11台机组的冷却电机电流信号进行全周期实时采集，并对比改造前后电机在典型工况下的运行稳定性、功率响应曲线与异常段电流波动幅度^[6]。在大风季连续运行阶段，齿轮箱润滑系统长期承受高温工况负载，改造前的散热器与风机叶片风量存在明显不足，导致冷却电机在风阻增大状态下持续运行偏高电流。采样系统选取滑动窗口宽度为5秒，每个窗口内记录当前平均电流值与标准差，提取冷却电机电流异常段持续时间指标，用以评估预警系统捕捉异常趋势的能力。改造后风量翻倍，叶片桨角优化后轴功率趋稳，运行电流上升但波动显著下降。在高负荷持续运行阶段，系统表现为高功率平稳区间，整体电流振幅低于0.3A，异常点分布稀疏，说明冷却负载转化为均匀热交换，不再触发短时冲击负载现象。典型机组FD07在改造前后表现出相对一致的负载水平差异，有效数据样本中电流曲线连续性增强，预警系统可依据电流标准差下移特征作为调整阈值的依据，为系统识别模型提供修正基线。冷却电机改造前后电流信号特征对比如下图1所示：

改造前冷却电机运行电流平均值在3.65~3.73A之间，标准差波动在0.49~0.57，异常段持续时长集中在28~39秒，表现出高幅度不稳定运行特征。改造后电流平均值略有上升至3.94~4.06A，但标准差显著下降至0.27~0.31，异常持续时间压缩至5~7秒，说明系统运行趋于稳定，波

动减小，故障前电流信号更具识别边界。

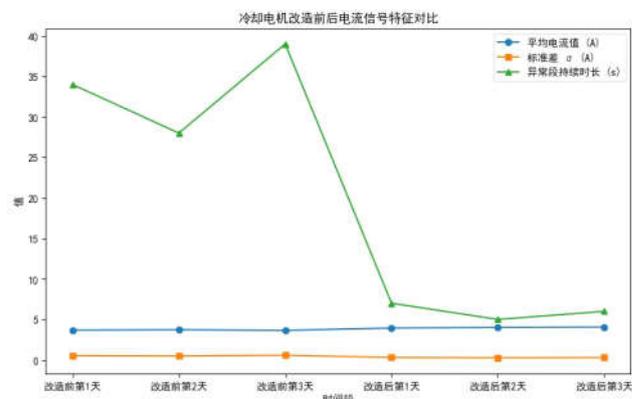


图1 冷却电机改造前后电流信号特征对比 (单位: A, s)

4.2 冷却电机故障预警准确率评估

冷却电机预警系统的准确率评估基于风电场改造后的连续运行记录，涵盖11台机组在高负荷与复杂运行环境下的故障行为响应。电机预警系统的触发条件与实际运行中的典型故障事件进行一一对应核查，包括风机散热器堵塞、风道风量衰减、电机震动偏大、润滑泵供压异常、油温控制阀失灵、冷却电机绝缘低警告六类故障类型。每类故障采集最少三个事件样本，统计预警系统在事件发生前所发出的报警信息，并对比人工巡检记录与SCADA控制日志，确认报警信息是否提前覆盖故障征兆。误报定义为系统报警但未发现实际故障或未影响运行，漏报定义为系统未报警但设备实际出现异常。系统在风道堵塞与叶片偏心引发的高负载振荡情况下报警灵敏，电机内部绝缘异常与润滑流量突降识别能力依赖于采样精度与噪声抑制能力。以下表1为冷却电机在典型故障场景下的预警命中情况统计表，展示系统在不同故障类型下的误报、漏报与有效识别表现：

表1 冷却电机典型故障类型与预警响应情况统计表 (FD03, 单位: 次)

故障类型	预警触发次数	实际故障确认	误报次数	漏报次数
散热器翅片严重堵塞	5	5	0	0
风扇叶片桨角偏移	4	3	1	0
润滑泵供压不足	6	5	1	0
电机绝缘电阻低于0.5M Ω	4	3	1	0
油温阀响应滞后	3	3	0	0
风道震动引发跳闸	5	4	1	0

在典型机械类与热负载类故障中，预警系统能够在故障前有效触发报警信号，其中风扇与电机类内部故障识别存在1次量级误报，未出现漏报。系统具备场景适应性，并可结合长期数据样本训练进行预警模型参数优化。

5 结论

基于冷却电机电流信号的故障预警系统结合齿轮箱

实际散热工况、电机运行特征与风电场现场数据构建了高精度识别模型，滑动窗口与多阈值联合判别算法可有效捕捉负载异常趋势，报警逻辑具备抗干扰能力与响应实时性，系统在典型故障工况下未出现漏报，现场运行表现出电流波动显著下降与报警触发前置，验证了算法结构与接口联动机制的实用性，该系统可扩展至风电

组运行控制平台形成分布式状态诊断框架。

参考文献

[1]张超,宁阳,雷正伟,等.海河口泵站齿轮箱冷却系统存在问题及解决对策分析[J].海河水利,2024,(06):77-78+82.

[2]王现海.基于深度学习的永磁同步电机测试分析与故障预警方法及应用[D].青岛科技大学,2024.

[3]郭涵涛.基于时间序列预测的风电齿轮箱系统故障预警[D].华北电力大学(北京),2023.

[4]程显栋.大功率循环泵行星齿轮箱可靠性分析与疲劳寿命预测[D].电子科技大学,2023.

[5]黄仁洸,师明.基于风电机组全生命周期的齿轮箱润滑油冷却系统设计与研究[J].企业管理,2022,(S2):24-25.

[6]黄金余,陈帅,石玉婷,等.风力发电机组齿轮箱冷却润滑系统可靠性提升与应用[J].船舶工程,2019,41(S1): 315-318.