

基于数据融合的水轮发电机定子绕组温度监测方法研究

姜运^{1,2} 申潘威^{1,3} 万元^{1,2} 莫建安^{1,3} 潘平衡^{1,2} 陈伽^{1,3} 刘禹^{1,3}

(1 五凌电力有限公司 湖南 长沙 410004; 2 湖南五凌电力科技有限公司 湖南 长沙 410004;

3 五凌电力有限公司株溪口水电厂 湖南 益阳 413405)

摘要: 水轮发电机定子绕组温度监测对于发电机安全运行来说非常重要。大型发电机定子绕组温度传感器通常安装于绕组中部。随着发电机服役时间变长,定子绕组温度传感器会逐渐老化,导致温度监测不准确或失去监测功能,严重影响发电机的运行可靠性。若要更换温度传感器,需要对发电机进行大型维修,维修复杂,甚至会破坏绕组绝缘。针对该问题,本文提出了基于数据融合的水轮发电机定子绕组温度监测方法,通过绕组端部温度的监测即可预测绕组中部监测点温度。并进行了现场测试,测试结果验证了所提出的温度监测方法的可行性。

关键词: 水轮发电机; 定子绕组; 温度监测; 数据融合

0 引言

目前,大型水轮发电机定子绕组温度测量系统的布置,多在发电机制造阶段采取预埋测温探头的方式开展^[1]。最常见的方法是将测温电阻预埋在定子绕组上层线棒与下层线棒的层间绝缘中。由于探头长期运行在高温、振动、油腐蚀等恶劣的环境中,造成测温传感器元件损坏,导致温度监测不准确或失去监测功能^[2]。

若要更换温度传感器,则要拔出定子线棒,相当于把发电机最核心的部分拆开重装。定子绕组数量多,施工工艺难度大,时间、人力、物力、财力耗费大。若工艺不到位,设备运行一段时间后甚至可能损坏,导致发电机报废,带来巨额经济损失。因此,在实际生产工作中,基本不采取上述方式解决定子测温问题,一般选择定子绕组的其他部位安装测温探头,采取相应的补偿措施,近似替代原来部位的温度^[3]。

文献[4]采用在定子绕组上层线棒和槽楔之间安装测温探头,该方法施工较为简单,但需要对定子绕组温度进行系统修正;此外,该方法需要拆开磁极及槽楔,工作量大,温度估计方法粗略,未考虑环境及负荷对温差的影响,误差较大。为了确保发电机定子线棒温度可监控,本文提出了基于数据融合的定子绕组温度监测方法。首先将温度传感器安装在发电机定子线棒的端部表面,通过定子绕组历史运行数据,分析定子绕组中部温度和表面温度的关系,建立数学模型;然后通过安装在定子绕组表面的光纤探头测量温度推算定

子绕组中部温度;最后在远程运维系统中进行实施,通过现场测试结果验证了温度监测系统的可行性。

1 温度传感器安装

水轮发电机定子部分的轴向切面图如图1(a)所示。水轮发电机定子铁芯温度测量的温度传感器预埋在定子铁芯外侧,如图1(a)中点1所示。定子绕组预埋的温度传感器设置在绕组垫片之间,如图1(a)中点2所示。后期

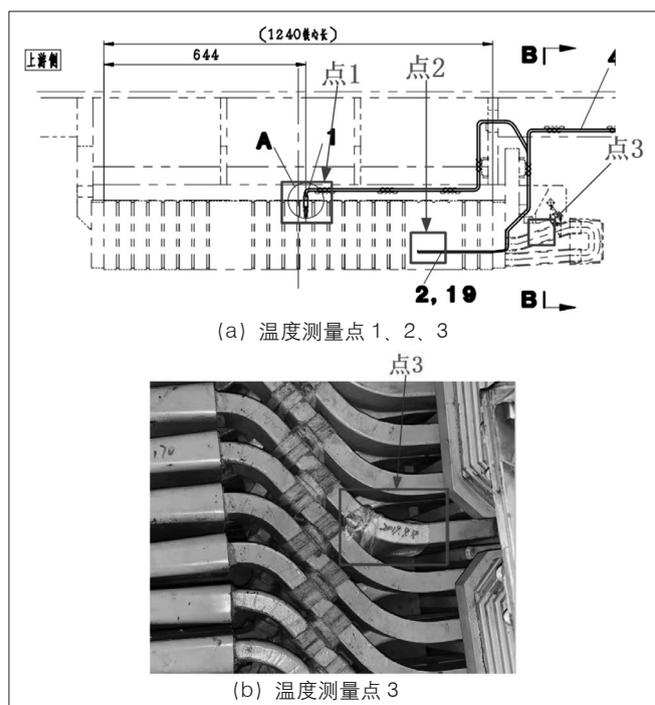


图1 测温点

加装的测温传感器放置在绕组端部,如图1(a)点3所示。对应点3加装的温度传感器实物图如图1(b)所示。

针对预埋在电枢绕组点2的温度传感器损坏的问题,本文拟通过加装在绕组端部点3温度传感器测得的温度来预测预埋在绕组点2的温度,实施电枢绕组温度的监测。

2 温度预测方法

水轮发电机温度受电机运行功率影响,与运行功率密切相关。但是,由于温度传递的延迟性,很难直接从功率的角度得到电机的电枢绕组侧温度。因此,本文直接通过绕组端部温度和中间温度之间的关系,建立温度分析模型,以预测电机电枢绕组中部的温度。由于电枢绕组温度测点2的温度传感器损坏,根据发电机周向对称性分布特点,取周向相同位置处的温度传感器的历史温度测试数据平均值进行分析。分析点3测得的温度和绕组中部点2温度平均值的关系式,建立相应的数学模型关系式。记点3测得的实际温度为 T_2 ,绕组中部温度平均值为 T_A ,拟寻找一近似关系式满足:

$$T_A = f(T_2) \quad (1)$$

1月至8月绕组中部温度传感器平均值与加装测点的温度关系如图2所示。每个月数据曲线变化趋势基本相同,即可以通过平移大致重合曲线,平移方向如图2所示。将图2中前三个月的关系曲线向下延长将会与直线 $T_A=T_2$ 产生交点,其意义是绕组端部和绕组中部温度相等,这意味着电机绕组此时没有发热,即电机绕组不通电,传感器测得的是当时的参考温度,推测出前三个月平均 T_0 约为 17°C 。

因为不同季节参考温度不同导致传感器点3测得的温度和绕组中部平均温度的关系在不同季节产生较大

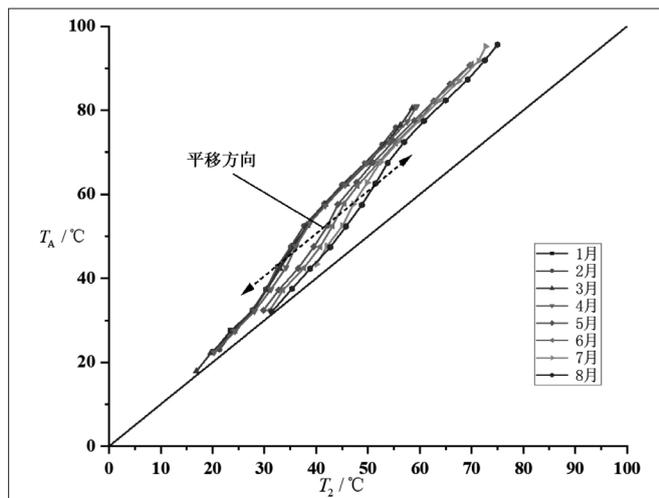


图2 历史温度数据关系曲线

差异。于是,为消除不同参考温度的差异,式(1)则需修改为:

$$T_A - T_0 = g(T_2 - T_0) \quad (2)$$

式中: T_0 —当前参考温度。

根据式(2)平移图2中所有数据点。由此可见,1月至8月的数据点基本存在同一种关系,用同样的方法处理9、10、12月的数据(11月停机检修,所以没有11月数据),结果如图3所示。

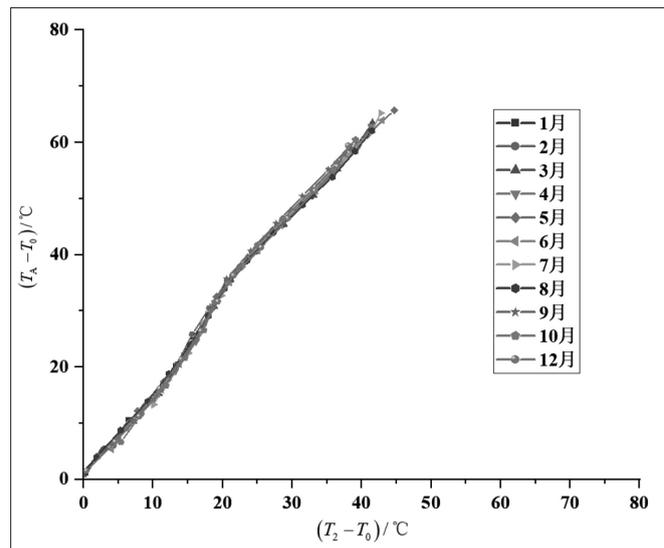


图3 一年内传感器点3温度关系

从图3可以看出,不同月份的温度关系通过偏移平移后的变化曲线基本一致。本文通过最小二乘法对温度曲线进行拟合,得到电枢绕组的温度变化曲线。电枢绕组的温度变化是分段曲线。因此,本文通过分段拟合得到电机电枢绕组的温度关系。通过数据拟合,得到的函数表达式如下:

$$y = g(x) = \begin{cases} 1.48x & x \leq 9 \\ 1.04x + 3.96 & 9 < x \leq 11 \\ 1.98x - 6.37 & 11 < x \leq 19 \\ 2.17x - 9.98 & 19 < x \leq 21 \\ 1.31x + 8.08 & x > 21 \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),整理得:

$$T_A = \begin{cases} 1.48(T_2 - T_0) + T_0 & T_2 \leq T_0 + 9 \\ 1.04(T_2 - T_0) + T_0 + 3.96 & T_0 + 9 < T_2 \leq T_0 + 11 \\ 1.98(T_2 - T_0) + T_0 - 6.37 & T_0 + 11 < T_2 \leq T_0 + 19 \\ 2.17(T_2 - T_0) + T_0 - 9.98 & T_0 + 19 < T_2 \leq T_0 + 21 \\ 1.31(T_2 - T_0) + T_0 + 8.08 & T_2 > T_0 + 21 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)即为传感器点3绕组端部温度到绕组中部温度的估算表达式,均为一次线性函数。传感器点3五

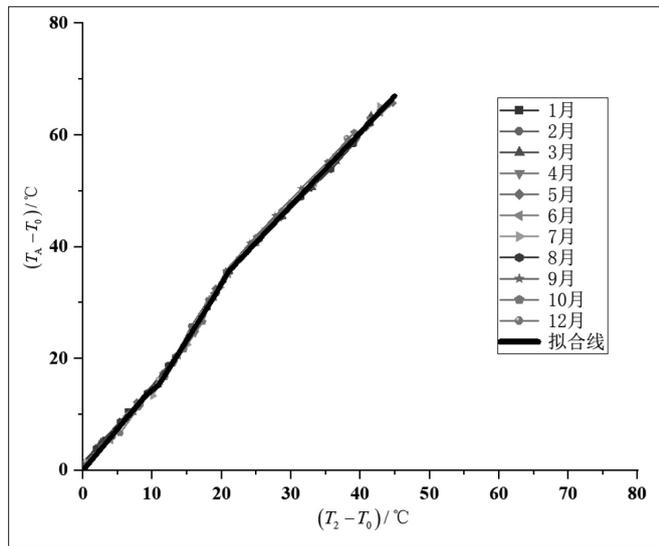


图4 传感器五段式拟合函数

表 近11个月 T_0 值

月份	1月	2月	3月	4月
温度 / °C	17	17	17	18
月份	5月	6月	7月	8月
温度 / °C	25	27	30	33.5
月份	9月	10月	11月	12月
温度 / °C	32	26	-	21

段式拟合函数图像如图4所示。可以看出，在历史数据温度中，拟合得到的分段温度变化曲线基本一致。

事实上，一个月中每天温度不尽相同，甚至一天中不同时刻的温度也不相同。本文通过历史数据拟合得到不同月份的参考值 T_0 。最近11个月的平均参考温度 T_0 见下表， T_0 即为参考温度，而 T_0 为式(4)关键参数。可以看出，参考温度随着季节变化有着较大的变化，其中，夏季温度最高，冬季温度最低。本文提出的温度测试系统中， T_0 通过在电机运行腔体内的温度传感器实时获得。

3 应用效果

为了验证提出方法的有效性，本文将该方法应用到五凌电力株溪口电厂。为了提高测温传感器的可靠性，本系统中使用了长寿命抗电磁干扰的光纤测温系统。整个系统拓扑结构如图5所示，包括发电机、光纤温度传感器、延长光纤线、光纤温度端子箱、测温制动屏及上位机服务器，将式(4)对应的数学模型植入到上位机服务器中。将光

纤温度传感器测得的端部温度传送到上位机服务器，然后通过本文提出的方法，计算电枢绕组中部温度，实现对应电枢绕组中部温度的预测。本文为了验证上述提出方法的可行性，在电枢绕组中间设置有性能良好的温度传感器的绕组端部加装了一个温度传感器，对比实际值与预测值的差别。

取2022年3月19日03:30~3月21日07:30修正的温度数据进行统计分析。上述时间段内各个测点的温度随时间的变化趋势如图6所示。图6中曲线表示的中部实际温度、中部等效温度、端部测试值、中部估算值定义如下：中部实际值是指正常测温的原有中部铂电阻探头的测量值；中部等效值是指测温失效的原有中部铂电阻探头，采用正常测温的铂电阻探头的平均值代替其测量值；端部测试温度是指安装在定子绕组端部表面的光纤温度探头和铂电阻温度探头；中部估算值是远程运维系统预测的中部温度。

由图6可以看出，随着时间变化，发电机输出负荷发生变化，导致电机电枢绕组的温度也会随之变化。端部测试值、中部实际值（或中部等效值）、中部估算值的变化趋势相同，中部实际值（或中部等效值）与中部估算值曲线基本重合，且温度较高时曲线重合度高，温度上升过程及温度出现拐点时，曲线重合度受影响。经分析以下主要原因。(1)热传导过程需要时间的累积。定子绕组为发热源，定子中部的热量沿定子绕组向其端部扩散。发电功率增大温度上升时，端部温度较中部温度上升有一定滞后，再加之程序修正本身的延迟，故采集端部光纤探头温度进行估算的值偏低。(2)发电功率减小温度下降时，定子绕组的冷却风机依然运行，此时绕组中部产生的热量减少，同时端部温度下降较为明显，

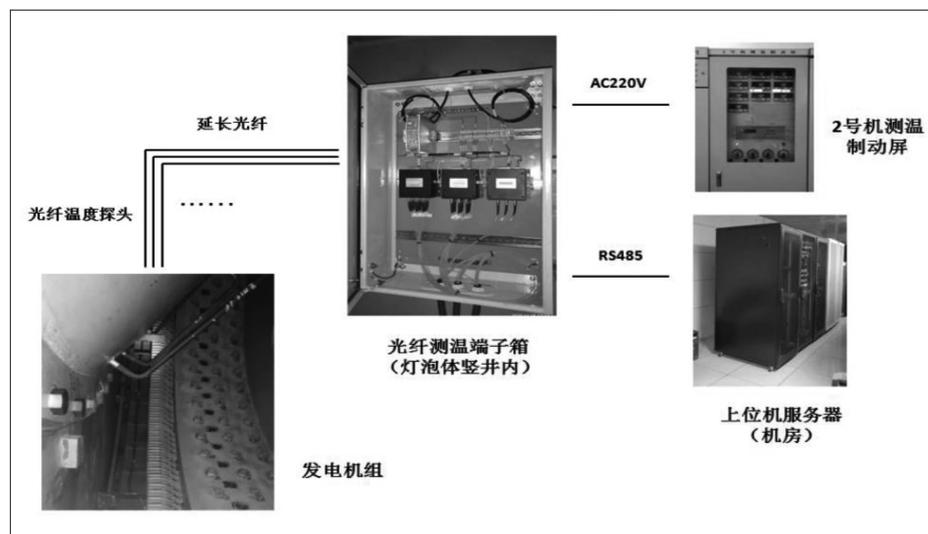


图5 测温系统拓扑图

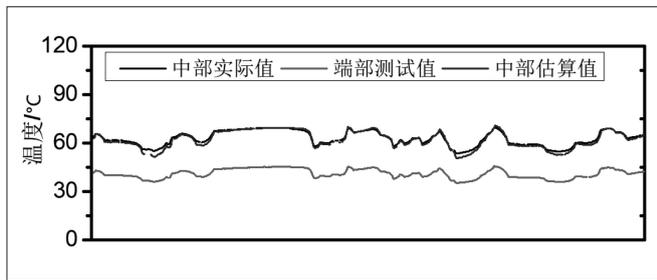


图6 温度变化趋势图

绕组中部温度相对端部下降低，因此估算值较真实值偏低。(3) 机组满负荷运行时，定子绕组温升更高，此时最容易发现定子绕组中部存在的问题，因此在制定修正方法时，首先考虑机组满负荷运行情况。

由于光纤温度传感器安装的位置在绕组表面，会受到安装位置、通风散热等因素的影响，导致其预测值和实际值的偏差也不同。但是，总体上来看预测值和实际值相差较小，平均误差小于 0.75℃，满足工程需要。

4 结语

本文针对大型水轮发电机绕组中部温度传感器损坏的问题，提出了基于数据融合的水轮发电机定子绕组温度监测方法。通过在绕组端部温度的监测，结合历

史数据，得到了不同温度分段下的表达式，建立了绕组端部温度和绕组中部温度的数学模型。在此基础上，搭建了绕组温度的测试系统，通过现场测试验证了所提出的温度监测方法的可行性，能够满足工程应用。本文提出的方法为大型水轮发电机的绕组温度监测提供了一种新的思路。

参考文献：

- [1] 范镇南, 韩力, 周光厚, 等. 大型贯流式水轮发电机阻尼绕组损耗与发热 [J]. 高电压技术, 2011, 37(02): 468-475.
- [2] 兰紫君. 水轮发电机定子绕组温度预警研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
- [3] 侯云鹏, 李伟力, 周封, 等. 绝缘老化对大型水轮发电机定子最热段温度场的影响 [J]. 大电机技术, 2001(01): 17-22.
- [4] 叶超平, 陈喜新. 发电机定子测温元件老化的补救措施 [J]. 华电技术, 2011, 33(06): 52-54.

作者简介: 姜运 (1990.07-), 男, 汉族, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水电厂生产与运行维护。

(上接第60页)

表4 均流器结构各主要部件最不利截面应力评定 /MPa

工况	部件名称	σ_1	$\sigma_1 + \sigma_2$	评定结果	工况	部件名称	σ_1	$\sigma_1 + \sigma_2$	评定结果
B级 工况	均流器法兰	6.76 < 117	22.80 < 175	合格	D级 工况	均流器法兰	13.00 < 175	28.80 < 263	合格
	圆筒1(外筒)	3.69 < 117	12.80 < 175	合格		圆筒1(外筒)	7.30 < 175	16.40 < 263	合格
	圆筒1(内筒)	0.96 < 117	2.08 < 175	合格		圆筒1(内筒)	1.45 < 175	2.49 < 263	合格
	中心圆筒	2.02 < 117	5.54 < 175	合格		中心圆筒	3.49 < 175	7.02 < 263	合格
	叶片1(外层)	5.46 < 117	5.81 < 175	合格		叶片1(外层)	6.65 < 175	7.00 < 263	合格
	叶片2(内层)	1.10 < 117	1.56 < 175	合格		叶片2(内层)	1.55 < 175	2.20 < 263	合格
	加强筋	1.07 < 117	4.76 < 175	合格		加强筋	2.32 < 175	5.95 < 263	合格

参考文献：

- [1] 韩壮, 马杰, 周刚, 等. 基于DNN与PCA的核动力装置故障诊断方法研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(11): 147-153.
- [2] 郭筱曦, 田岱, 朱安文, 等. 国外空间核动

- 力装置应用安全机制分析及启示 [J]. 核科学与工程, 2022, 42(05): 1212-1221.
- [3] 核工业标准化研究所. 核空气和气体处理规范 设计和制造通用要求: NB/T 20038-2011[S]. 北京: 原子能出版社, 2011.