

面向高海拔空冷发电机防晕性能演化规律的 电热耦合研究

黄洲¹, 王超², 齐梦瑶², 赵亦嘉², 刘凌¹, 张跃^{1,3}, 王发强¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 中国雅江集团有限公司, 860000, 西藏林芝;
3. 东方电气集团东方电机有限公司, 618000, 四川德阳)

摘要: 针对高海拔环境易导致大型空冷发电机定子线棒防晕系统出现长期稳定性劣化的工程问题,以额定电压 18 kV 空冷发电机定子线棒为研究对象,开展面向高海拔定子线棒防晕性能演化规律的系统研究。提出基于电热耦合老化试验的防晕材料抗老化性能表征方法,采用层次分析法筛选并制备多种模拟试样,结合 2 000 h 长时间尺度电热老化试验,完成防晕材料的最优选型。通过构建电热耦合作用下防晕材料的非线性电阻率模型,基于黑体辐射修正理论建立高精度定子线棒电-热多物理场双向耦合求解方法,利用 COMSOL 有限元法对定子线棒稳态与瞬态电热特性进行数值仿真分析。实验结果表明:高海拔修正测试中,定子线棒温升显著增大,起晕电压修正测试的最高温度较常规海拔工况提高 74.9%,最大电场强度提高 11.9%,温度增幅显著高于电场强度变化。仿真结果与实验数据的相对误差低于 5%,验证了所建模型与求解方法的准确性。该研究可为高海拔及超高海拔空冷发电机防晕系统优化设计提供理论依据与工程参考。

关键词: 空冷发电机;电热老化;有限元法;双向耦合;防晕性能

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607020 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0219-9

Electrothermal Coupling Research on the Evolutionary Law of Anti-Corona Performance for High-Altitude Air-Cooled Generators

HUANG Zhou¹, WANG Chao², QI Mengyao², ZHAO Yijia², LIU Ling¹,
ZHANG Yue^{1,3}, WANG Faqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Yajiang Group Co., Ltd.,
Linzi, Xizang 860000, China; 3. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: To address the engineering challenge of degraded long-term stability of anti-corona systems for large air-cooled generator stator bars at high altitudes, the stator bars of an 18 kV air-cooled generator were investigated. Systematic research on the evolutionary law of anti-corona performance for stator bars at high altitudes was conducted. A characterization method for the anti-aging performance of anti-corona materials based on electrothermal coupling aging tests was proposed. Various simulated samples were screened and prepared using the analytic hierarchy process (AHP), and the optimal anti-corona material was selected through a long-term electrothermal aging test for 2 000 h. Furthermore, a nonlinear resistivity model of anti-corona

materials under electrothermal coupling was constructed. Based on blackbody radiation correction theory, a high-precision bidirectional coupling solution method for the electrothermal multi-physics field of stator bars was developed, and the steady-state and transient electrothermal characteristics were numerically simulated using the COMSOL finite element method. Experimental results demonstrate that in high-altitude correction tests, the temperature rise of stator bars increased significantly. Compared with low-altitude conditions, the maximum temperature measured during the corona onset voltage test increased by 74.9%, whereas the maximum electric field strength increased by 11.9%, indicating that the temperature rise was substantially larger than the change in electric field strength. The relative error between the simulation results and experimental data was observed to be less than 5%, verifying the accuracy of the proposed model and solution method. This research provides a theoretical basis and serves as an engineering reference for the optimal design of anti-corona systems used in air-cooled generators at high and ultra-high altitudes.

Keywords: air-cooled generator; electrothermal aging; finite element analysis; bidirectional coupling; anti-corona performance

我国水电开发的重点正逐步向水力资源丰富但自然条件极为恶劣的高海拔地区转移,例如西藏雅鲁藏布江流域干流等地。如何保障发电机组在高海拔环境中长期可靠运行成为亟需解决的问题。

发电机是我国核心发电设备,定子线棒作为发电机实现电能转换的关键部件,其可靠性直接决定了发电机的长期稳定运行。我国多个省份的水电厂曾因定子线棒电晕故障引发停机检修,造成重大经济损失,例如四川紫坪铺电站因定子线棒电晕老化引发发热效应,导致绝缘性能持续劣化,最终在交流耐压试验中发生线棒击穿,被迫停机维修^[1]。定子线棒出槽口处的结构与套管法兰相近,电场具有显著的切向和垂直分量,易诱发局部电晕放电现象。定子线棒端部防晕保护层可通过其非线性电导特性实现端部电场的均一化,进而有效抑制表面电晕放电的产生^[2-5]。在高海拔低气压环境中,气压降低导致空气介质密度减小,散热效能显著降低,电晕起始电压大幅下降。研究结果表明,当海拔超过 4 500 m 时,定子线棒电晕起始电压较常规海拔平均电晕起始电压下降 36.5%^[6],因此高海拔地区定子线棒电晕故障更易发生。

国内外学者聚焦于电机电晕失效机制^[7-11]及损伤诊断^[12-15]。文献[8]分析启停周期性交变电磁应力作用对发电机防晕的影响,但未考虑热场因素对于防晕作用的制约效应。中国学者围绕不同相间电场分布规律展开分析,为防晕薄弱区域的优化提供了依据^[16-17],但并未考虑长期老化因素对防晕材料电学性能的影响。文献[18]考虑定子线棒结构模型

及材料的电气性能,但缺乏考虑防晕材料受热学参数影响的分析。过高的温升会导致高阻防晕带失去原有的均压性能,进而引起系统沿面电场分布的变化^[19-20]。尽管电击穿会导致电气绝缘最终失效,但老化机理是由绝缘材料的热降解主导的^[3,21-22]。

目前针对空冷发电机的研究多集中于常规环境下的电学性能表征,未深入探讨大时间尺度电热老化对防晕性能的影响,也未考虑高海拔修正电压带来的温度效应。防晕材料长期处于高温环境会导致防晕性能退化,将引发局部电晕放电,进而导致设备绝缘故障,影响高压电气设备的安全稳定运行。因此,电-热多物理场双向耦合的发电机定子线棒防晕系统性能演化规律研究,对保障高海拔机组长期安全稳定运行具有重要意义。

本文聚焦高海拔环境下,空冷发电机定子线棒因散热效率下降,起晕电压降低,进而引发防晕系统稳定性劣化的问题。基于层次分析法,对多种模拟试样进行大时间尺度下电热老化实验,实现防晕材料防晕性能演化规律表征。分析温度与伏安特性的关系,构建电-热联合作用的非线性电阻率模型。建立复合型定子线棒防晕结构模型,通过二次非线性防晕层提高其防晕性能。通过黑体辐射修正建立了高精度的定子线棒电-热多物理场双向耦合方法,实现其稳态、瞬态电热分析。对比有限元仿真与实验温升测试结果,验证了仿真模型的准确性。所选材料及结构通过工程考核,满足高海拔机组设计要求,可为高海拔及超高海拔空冷发电机防晕系统优化设计提供理论依据与工程参考。

1 定子线棒防晕材料电热老化演化规律

定子线棒是发电机的关键部件之一,其运行过程长期受到电、热等应力联合作用,易导致防晕性能逐渐劣化,进而引发局部电场畸变并诱发电晕放电。电晕放电的热效应及放电过程中产生的活性粒子会侵蚀局部绝缘结构,导致材料分解并生成白色粉末状绝缘降解产物。因此,定子线棒防晕材料在多场耦合下的长期稳定性研究,对提升发电机运行可靠性具有重要意义。

本文针对国内外主流发电机防晕材料开展研究,包含8种低阻防晕材料、8种高阻防晕材料。基于层次分析法,将防晕材料具有最优抗老化性能设定为目标层,设置老化实验中防晕材料的外貌变化及电气性能变化为准则层,多种防晕材料为方案层。采用与实际定子线棒相同的主绝缘-防晕层多层复合结构,制备模拟试样进行2000 h电热老化实验。分析定子线棒防电晕材料在多场耦合作用下的老化机理,研究热氧老化对防电晕材料电阻率的影响规律,获取具有强抗老化性能的防晕材料。

1.1 大时间尺度电热老化下防晕材料腐蚀行为与机理

为研究防晕材料在长期电热耦合应力下的劣化腐蚀规律,设计并开展长期电热老化实验,实验终止判据设定为防晕层发生物理损伤或防晕性能丧失。图1为模拟线棒电热老化实验的接线测试示意图。本文在电热老化实验过程中,采用12 kV工频交流电压作为老化电压,并控制实验温度 $120 \pm 2^\circ\text{C}$ 作为老化温度。按图1接线方式施加老化电压,通过烘箱设置老化温度。

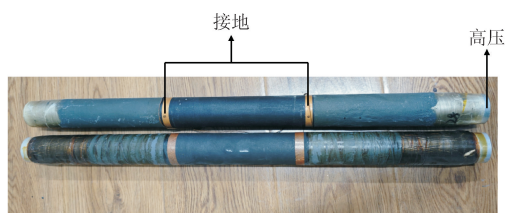


图1 模拟线棒电热老化接线测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of wiring test for thermal-electrical aging of simulated bars

实验结果表明,采用不同防晕材料组合制备的模拟试样,在长期电热老化过程中均呈现出表面腐蚀,且随老化时间延长而逐渐加剧。具体表现为腐蚀面积随老化时间累积呈持续扩大趋势,同时腐蚀位点数逐步增多。图2展示了部分防晕材料组合在

1500~2000 h长期电热老化过程中的表面腐蚀演化历程,图中红色标记为模拟线棒的腐蚀痕迹。



(a)组合 A



(b)组合 B



(c)组合 C

图2 模拟线棒电热老化过程中腐蚀情况

Fig.2 Simulation of corrosion during the electrothermal aging process of dummy bars

不同防晕材料组合的抗老化性能存在显著差异。由图2(a)可知,组合A的表面腐蚀程度相对较轻,在2000 h老化周期内,其腐蚀面积始终维持在较低水平,腐蚀面积相对较小,且腐蚀面积随时间的增长速率较为平缓;而图2(c)所示的组合C则出现较大面积表面腐蚀,且腐蚀面积随老化时间的扩展趋势显著,老化末期腐蚀面积占试样总面积的40%。

基于上述实验结果,在2000 h长期电热老化过程中,表面耐电热老化腐蚀性能较好的试样分别为高阻防晕材料A1、B1、C1和低阻防晕材料A2、B2、C2。为进一步研究高阻防晕材料电气性能在长期老化过程中的演化规律,通过Megger兆欧表测量其非线性伏安特性,完成定量化表征,为消除不同材料初始性能差异对分析结果造成的干扰,测试数据已进行归一化处理,结果如图3所示。

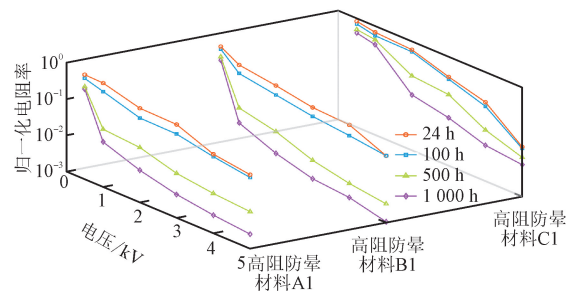


图3 高阻防晕材料电阻率随老化时间的变化

Fig.3 Variation of resistivity of high-resistance anti-corona materials with aging time

实验结果表明,3 种高阻防晕材料在老化过程中的电气性能变化规律整体趋同,均表现为随老化时间延长电阻率逐渐下降,但具体电阻率变化幅度略有不同。在 1 000 h 老化周期内,不同材料电阻率下降幅度存在差异,材料 B1 下降最显著,而材料 C1 下降幅度最小,仅为 41.4%,表明其抗老化性能最优。基于上述长期电热老化实验结果,结合表面电阻率稳定性与内部结构完整性,本研究选取高阻防晕材料 C1 作为研究对象,用于开展电-热耦合仿真分析及定子线棒实验验证。

高阻防晕带材料为碳化硅复合材料,其非线性导电特性主要由碳化硅颗粒的分布密度与晶型结构决定。在热老化初期,高阻防晕带材料中内部的交联反应可能占据主导地位,随着反应的进行,一些微小杂质等小分子物质析出,碳化硅颗粒发生局部收缩。随着老化时间的增加,高阻防晕材料内部的热降解反应逐渐占据主导地位,高阻防晕材料内部化学结构遭到破坏,复合材料的浅陷密度增加,碳化硅颗粒间的有效通道更容易击穿。在外施电场相对较低时,载流子也将脱陷,导致在低电场强度下载流子浓度增加,电阻率下降。

1.2 防晕材料在电-热耦合作用下的非线性电阻率模型

为建立防晕材料受电热联合影响的非线性电阻率模型,针对筛选出的老化性能较优的防晕材料,开展不同温度条件下的伏安特性测量,相关实验结果如图 4 所示,数据已进行最大值归一化处理。实验结果表明,低阻防晕材料均呈现随温度升高电阻率略微下降的趋势,3 种低阻材料的电阻率从大到小排序为 ρ_{B2} 、 ρ_{C2} 、 ρ_{A2} 。从工程应用角度分析,低阻防晕材料的核心功能是降低定子线棒的铁心槽内电位,而较低的初始电阻率更利于铁心槽内电位的抑制,因此选取低阻防晕材料 A2 作为后续电-热耦合仿真及定子线棒验证实验对象。低阻防晕材料主要由基体环氧树脂掺杂无机填料炭黑或石墨构成,上述温度依赖性特征与炭黑/石墨载流子输运受温度激活的本征特性一致。

高阻防晕材料的电气性能测试结果如图 5 所示,为消除不同材料初始值差异对演化趋势对比的干扰,测试数据均已进行归一化处理。结果表明,各类材料初始电阻率的数值存在一定差异,但电阻率与非线性系数随温度的演化规律呈现出一致性。具体表现为:随着实验温度的升高,高阻防晕材料的初始电阻率逐渐下降,且其非线性系数同步呈下降趋势,这意味着,温度升高会降低高阻防晕材料对电压的响应敏感性^[23]。

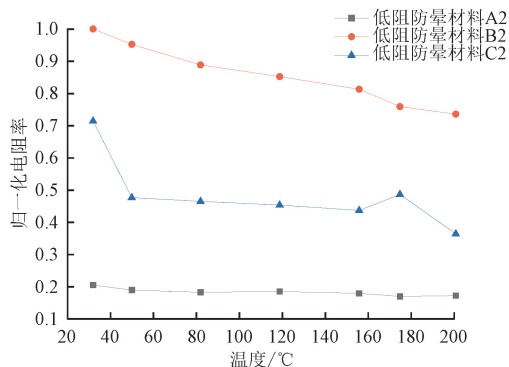


图 4 低阻防晕材料表面电阻率随温度的变化

Fig. 4 Trend of surface resistivity of low-resistance anti-corona materials with temperature changes

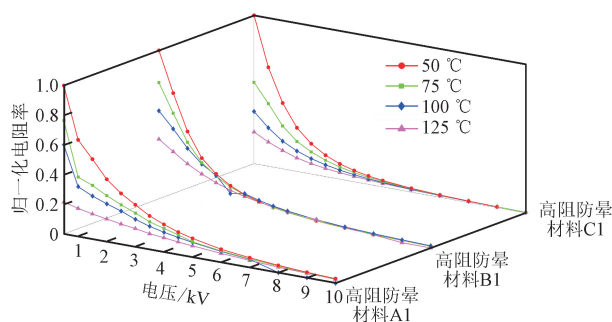


图 5 温度对高阻防晕材料伏安特性的影响

Fig. 5 Influence of temperature on the volt-ampere characteristics of high-resistance anti-corona materials

非线性系数随温度的演化规律源于温度对防晕材料中有效物质碳化硅颗粒电学性能的影响。碳化硅颗粒中的电子激发随温度提升而增强,促进了其载流子产生,进而降低其电阻率。当温度升高时,热激发占比增多,这促进低电场下形成导电通道,使得电流随电压变化趋于平缓,进而降低了其非线性系数。这种演化规律能够避免高阻防晕材料因温度持续升高而出现电阻率大幅下降的情况,从而防止电热不平衡状态的出现。

2 电热多物理场双向耦合模型的构建

2.1 定子线棒端部电-热模型

基于 COMSOL 有限元仿真软件,对定子线棒进行电-热双向耦合模型的构建与仿真,定子线棒端部电-热模型中,电场模块的控制方程为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -\nabla V \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量; O 为体电荷变化率; ω 为频率; ρ 为电阻率; $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; V 为电势; $\mathbf{J}_e$ 为外部注入电流密度矢量。

热场模块中,物体间的热能传递通常通过热传导、黑体辐射和热对流 3 种形式。工程上通常忽略热辐射的影响,其控制方程为

$$\begin{cases} d\gamma c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = dQ + q_0 + dQ_{\text{ted}} \\ \mathbf{q} = -dk \nabla T \\ q_0 = h(T - T_{\text{ext}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: d 为模型厚度; γ 为模型密度; c_p 为比定压热容; $\mathbf{u}$ 为速度场矢量; $\mathbf{q}$ 为热流密度矢量; Q 为热源密度; q_0 为表面热源密度; Q_{ted} 为电热热源密度; k 为热导率; h 为传热系数; T 为定子线棒温度; T_{ext} 为外界环境温度。

2.2 电-热耦合高温修正模型

随着高海拔环境下大容量发电机组的建设,高海拔地区散热效率下降,加之机组高容量带来的产热增加,导致发电机运行时温度升高。为确保所用模型在高温状态时的准确性,针对选取的低阻防晕材料 A2 开展实验验证。

图 6 为实测数据与不同仿真结果对比,传统工程模型的仿真温度与实测温度存在偏差,低温工况下两者整体吻合度较高,但在高电压引发的高温升温时,仿真温度显著高于实测温度。引入黑体辐射修正后,高温区间的仿真结果与实测结果吻合度提升。黑体辐射是高温物体能量传递的主导方式,低阻防晕带具有较高的表面发射率,当低阻防晕带承受较高电压时,表面温度提高,黑体辐射散热占比升高,原有模型仅考虑热对流的形式,将黑体辐射散热重新考虑后的修正形式如下式

$$\begin{cases} d\gamma c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = dQ + q_1 + dQ_{\text{ted}} \\ \mathbf{q} = -dk \nabla T \\ q_1 = h(T - T_{\text{ext}}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{ext}}^4) \end{cases} \quad (3)$$

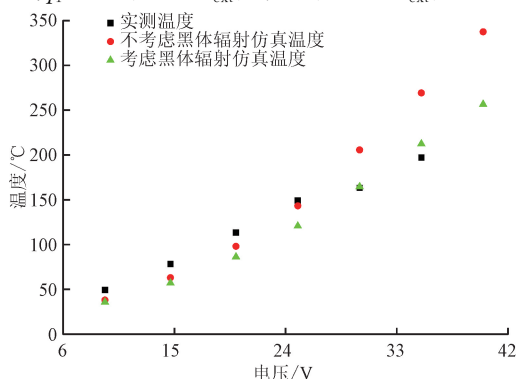


图 6 不同仿真结果与实测数据的对比

Fig. 6 Comparison between different simulation results and experimental data

式中: ε 为表面发射率; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数; q_1 为含黑体辐射修正后表面热源密度。

引入黑体辐射修正后,电热多物理场双向耦合方法精度显著提升,仿真绝对误差从 47.7% 降至 3.1%。

2.3 定子线棒复合型防晕结构

本文以高海拔额定电压 U_n 为 18 kV 的大型空冷水轮发电机定子绕组为研究对象,采用复合型防晕结构,即在一次成型防晕结构基础上增加二次防晕,对线棒防晕保护层表面补充分流。通过二次非线性调节,进一步均匀了原高阻区间的过渡电场分布,形成更均匀的绕组端部电场。一次成型加二次处理的具体结构如图 7 所示。

由于定子线棒为近似对称结构,槽部为铁心结构接地。低阻防晕层设置接地电位与铁心设置接地电位的偏差可忽略不计,因此本文在仿真计算中仅考虑定子线棒端部区域以减少计算量。

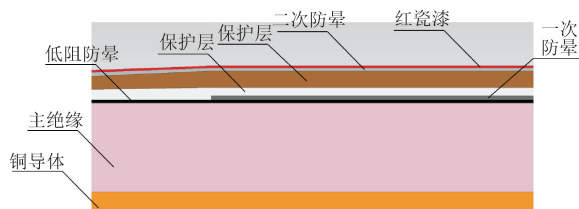


图 7 定子线棒复合防晕结构模型

Fig. 7 Stator bar composite anti-corona structure model

3 电热双向耦合仿真分析及实验验证

3.1 定子线棒双向电热仿真结果及分析

定子线棒的性能考核需以电晕抑制有效性与绝缘耐受可靠性为两大核心目标,具体考核要求与实施依据如下。在 $1.5U_n$ 起晕考核电压下,需确保定子线棒表面最大电场强度不超过空气介质的起晕电场强度阈值,以避免线棒表面发生局部电晕放电。在短时工频耐压实验中,施加 $2.75U_n + 6.5$ kV 考核电压并持续 1 min,实验过程中需确保线棒绝缘层无击穿、闪络及烧蚀等失效现象。根据国家标准 GB/T 311.1—2012《绝缘配合第 1 部分:定义、原则和规则》^[24] 进行考核电压修正,建立定子线棒起晕考核电压与绝缘耐压的海拔修正模型,为高海拔地区空冷发电机定子线棒的工程设计与选型提供技术支持。

为预先评估仿真模型结果的工程应用价值,本文建立多维度性能判定标准。基于前期防晕材料加速电热老化实验,确定该类防晕材料的长期极限耐受温度约为 155 °C。考虑到不同企业针对定子线棒

的电学性能评价细则存在差异化,且关键参数数值因商业保密未公开,难以直接采用相关标准。基于如下高海拔环境下定子线棒起晕电压经验拟合公式^[25],将其作为仿真结果电学性能的判定依据,以判断仿真结果是否超过起晕阈值

$$U_c(P, h_a, t) = 33.06 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.50} \left(1 + \frac{h_a}{(P/P_0)} \right)^{-0.12} \left(\frac{293}{273+t} \right)^{-0.27} \quad (4)$$

式中: P_0 为标准大气压; P 为气压; h_a 为绝对湿度; t 为摄氏温度。

有限元仿真中,定子线棒在考核电压作用下的电场与热场仿真结果如图 8、9 所示。

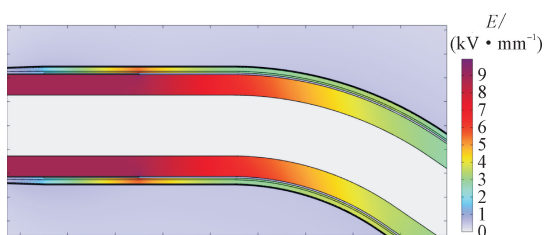


图 8 电热耦合中电场强度仿真实验结果

Fig. 8 Simulation results of electric field strength in electro-thermal coupling tests

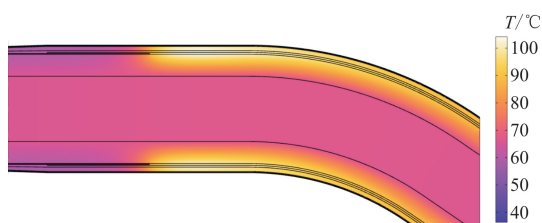


图 9 电热耦合中热场分布仿真实验结果

Fig. 9 Simulation test results of thermal field distribution in electro-thermal coupling

电场与热场仿真结果显示,定子线棒表面的最大电场强度及最高温度均集中分布于定子线棒过渡出槽口弯形区域。定子线棒出槽口弯形区域作为接地端与高压区的衔接区域,因几何形状突变导致电场畸变严重,并且该部位电流密度集中,局部能量损耗显著高于其他区域,最终使其成为线棒表面电场与温度双重畸变的核心区域。

起晕电压仿真结果如图 10 所示。厂内实验工况下,定子线棒的最高温度随海拔修正电压升高呈显著上升趋势,其最高温度由海拔 1 km 修正电压的 42.3℃,提高至 5 km 修正电压的 74.0℃,提高 74.9%。在电场强度方面,由海拔 1 km 时的 0.42 kV/mm 上升至 5 km 时的 0.47 kV/mm,最大电场强度提升 11.9%。

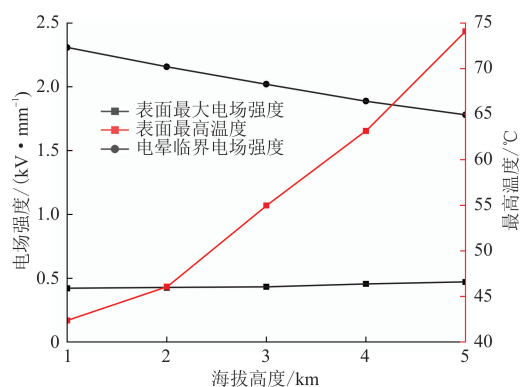


图 10 起晕测试中定子线棒表面最高温度与最大电场强度随海拔高度的变化

Fig. 10 Influence of temperature and electric field strength on corona inception test with altitude variation

本研究采用的复合型防晕结构具备二次防晕功能,修正电压后二次防晕区域的有效作用距离将会增大,可通过动态分压进一步均化线棒表面电场分布,从而抑制最大电场强度的快速增长。仿真实验中,定子线棒表面最大电场强度小于空气起晕临界电场强度。热学性能层面温度的提高远大于电学性能层面电场强度的提升幅度,未来高海拔发电机定子线棒的设计需重点关注热学性能优化,以规避高温诱发的防晕层老化与绝缘失效风险。

对于 1 min 耐压测试,其仿真实验结果如图 11 所示。与起晕实验一致,定子线棒的最高温度随海拔修正电压增大而升高。定子线棒表面最高温度由 68.8℃ 升至 141.8℃,提高 106%。耐压实验过程中,定子线棒最高温度不断提升但提升速率逐渐下降,且定子线棒表面最高温度并未超过 155℃。结合长期电热老化实验所确定的热性能耐受标准,初步判定该仿真结果满足热学方面的温度要求。

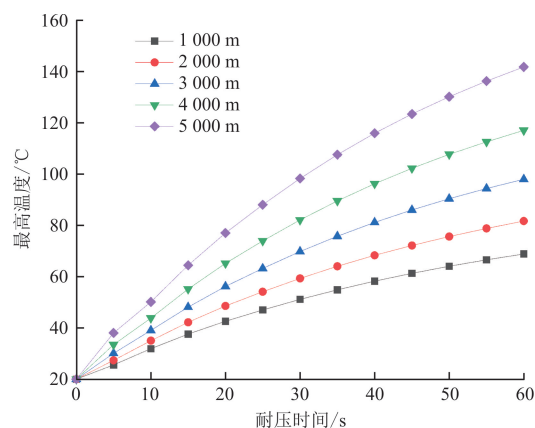


图 11 1 min 耐压过程中定子线棒表面最高温度变化
Fig. 11 Maximum temperature variation of stator bars during the 1 min withstand voltage process

本文补充稳态耐压实验对发电机定子绕组温度和表面电场强度的影响程度,仿真结果如图12所示。随着时间的增加,线棒温升效应进一步加剧,从1 km时定子线棒表面最高温度 95.2°C 变化为5 km时的 185.8°C ,最高温度提升了95.2%。本文定子线棒防晕设计采用“一次成型+二次处理”新型复合防晕方案,在外表面二次处理防晕层的调控作用下,定子线棒表面电场强度变化幅度相对较小。由1 km时的定子线棒表面最大电场强度 $0.48\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 变化为5 km时的最大电场强度 $0.53\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$,变化幅度为10.4%。

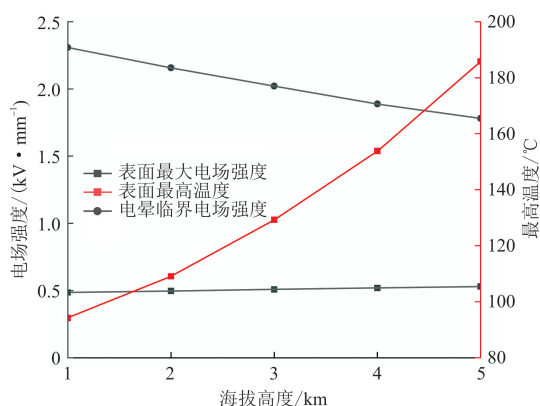


图12 稳态耐压测试中温度与电场强度随海拔高度的变化
Fig. 12 Influence of temperature and electric field strength on withstand voltage test with altitude variation

3.2 实验结果与模型验证

采用筛选出的防晕材料及复合型防晕结构,利用FLIR红外成像仪在2.1倍数字变焦情况下观察实际线棒表面温度,定子线棒 $1.5U_n$ 时起晕测试及 $2.75U_n+6.5\text{ kV}$ 电压作用下1 min耐压实验过程中温度成像结果如图13、14所示。

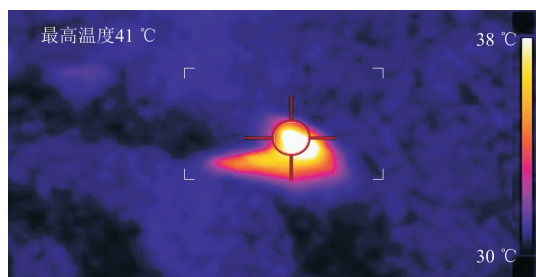


图13 $1.5U_n$ 起晕测试过程中稳态的红外测试结果
Fig. 13 Steady-state infrared test results during $1.5U_n$ corona onset test

有限元仿真计算的温度结果与实验实测数据具有较高的吻合度。红外实测结果同有限元仿真一

致,温度最高位置位于定子线棒出槽口弯形区域,且实测最高温度与仿真结果接近。不同考核电压与作用时间下仿真结果与实验结果对比如表1所示。

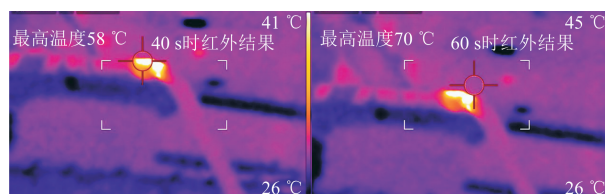


图14 耐压过程中40和60 s时红外测试结果
Fig. 14 Infrared test results at 40 and 60 s during the withstand voltage process

表1 不同电压红外测试与仿真实验结果

Table 1 Infrared test and simulation results under different voltages

电压激励	实测温度/ $^{\circ}\text{C}$	仿真温度/ $^{\circ}\text{C}$	绝对误差/%
起晕电压	41	42.3	3.20
耐压电压(40 s)	58	58.2	0.34
耐压电压(60 s)	70	68.8	1.70

针对同时生产的3只定子线棒2000 m海拔修正情况下,进行10 min耐压测试,测试结果如图15、16所示。随时间推进定子线棒最高温度呈逐步上升趋势,至10 min时接近 109°C 。图16中水平虚线对应于稳态温度仿真结果;实验后期,实测温度趋近该值,进一步验证了电热耦合仿真模型的有效性。

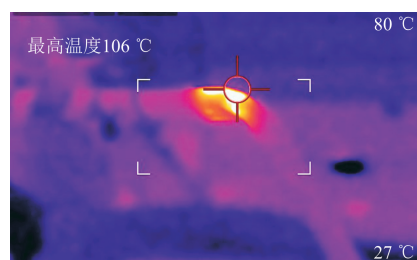


图15 63.28 kV下10 min耐压测试红外结果
Fig. 15 Infrared test results at 10 min during the 63.28 kV withstand voltage process

为全面评估所选用的防晕材料及复合型防晕结构工程适用性,通过UVolle紫外成像仪和LDS-6局部放电监测设备对所生产的定子线棒分别进行电晕实验光子数的检测与局部放电实验检测。施加 $1.5U_n$ 起晕电压测试的紫外成像仪结果与额定电压情况下,典型局部放电相位分辨图谱如图17所示。

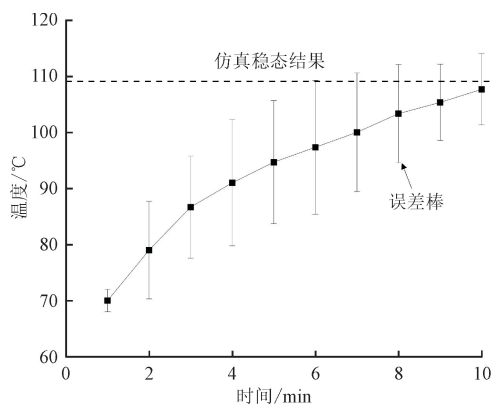
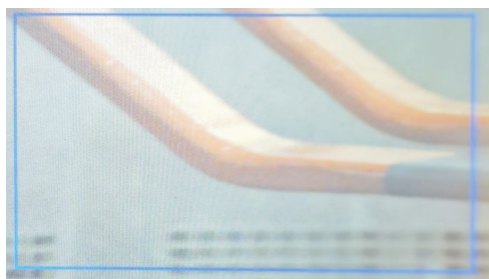
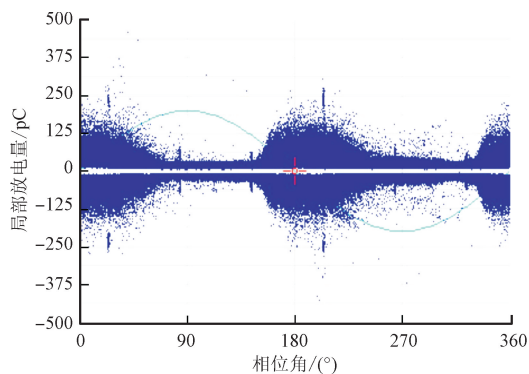


图 16 2 000 m 海拔修正电压 63.28 kV 下 10 min 耐压测试过程定子线棒温度变化

Fig. 16 Temperature variation trend of stator bars during the 10-minute withstand voltage test under the corrected voltage of 63.28 kV at an altitude of 2 000 meters



(a) 紫外成像仪结果



(b) 局部放电结果

图 17 UVolte 紫外成像仪与 LDS-6 局部放电实验结果

Fig. 17 Ultraviolet imager and partial discharge experimental results

紫外成像仪结果显示,线棒表面并未出现光子,表明并无电晕的发生。实验过程中,局部放电量均处于 500 pC 以下,无突发性脉冲,表明所选材料及复合型防晕结构下定子线棒无潜在缺陷。本文的研究成果具备明确的工程应用价值,可为后续高海拔地区发电机组的设计、制造与运行提供技术参考。

4 结 论

针对我国高海拔发电机组防晕系统长期电热稳定性研究的欠缺,本文首次通过 2 000 h 电热老化实验完成了发电机定子线棒防晕性能演化规律的研究。通过构建防晕材料受电-热联合影响的非线性电阻率模型,提出以黑体辐射修正,并结合复合型防晕结构,利用 COMSOL 有限元法建立了更高精度的定子线棒电-热多物理场耦合仿真模型。实验验证了模型的准确性,结论如下。

(1)在热氧老化过程中,防晕材料表面腐蚀面积逐渐增大且电阻率呈下降趋势。高阻防晕材料受电-热联合影响的非线性电阻率模型中,随温度的升高模型呈现初始电阻率下降、非线性系数降低的规律,表明温度升高会降低其电压响应敏感性。

(2)通过黑体辐射修正建立了高精度的定子线棒电-热多物理场双向耦合求解方法,仿真误差从 47.7%降至 3.1%。当海拔高度由 1 km 变化为 5 km 时,起晕测试过程中最高温度提升 74.9%,最大电场强度升高 11.9%,高海拔机组建设需重视机组温度管控。

(3)真机线棒实验验证了有限元模型的准确性,红外测试与仿真实验结果误差低于 5%。紫外光子实验与局部放电实验的工程测试结果证实所选材料与复合防晕结构的工程适用性。

参考文献:

- [1] 唐永钢,尹冲,张璇. 紫坪铺电厂 2 号机组定子绝缘击穿处理 [J]. 四川水力发电, 2018, 37(4): 57-59.
Tang Yonggang, Yin Chong, Zhang Xuan. Treatment of stator insulation breakdown in unit 2 of Zipingpu power plant [J]. Sichuan Water Power, 2018, 37(4): 57-59.
- [2] Dehlinger N, Stone G. Surface partial discharge in hydrogenerator stator windings: causes, symptoms, and remedies [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2020, 36(3): 7-18.
- [3] Naeini A, Cherney E A, Jayaram S H. Effect of conductivity on the thermal and electrical properties of the stress grading system of an inverter-fed rotating machine [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 179-186.
- [4] Emery F T. Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings [J]. IEEE Transactions on Dielec-

- trics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 347-361.
- [5] Stone G C, Warren V. Objective methods to interpret partial-discharge data on rotating-machine stator windings [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(1): 195-200.
- [6] 顾国彪, 郑小康, 阮琳. 浅谈中国未来大型水电装备技术挑战与创新 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6959-6972.
- Gu Guobiao, Zheng Xiaokang, Ruan Lin. Discussion on the technical challenges and innovations of large hydropower equipment in the future in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6959-6972.
- [7] 满宇光, 兰东宏, 赵阳, 等. 大型水轮发电机绕组端部电晕问题探讨 [J]. 大电机技术, 2022(4): 29-37.
- Man Yuguang, Lan Donghong, Zhao Yang, et al. Discussion on end-winding corona of giant hydro-generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(4): 29-37.
- [8] Yin Weijun. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 18-23.
- [9] 张跃, 梁智明, 胡波, 等. 采用混合核函数支持向量机算法的大型发电机定子线棒绝缘状态评估方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 44-50.
- Zhang Yue, Liang Zhiming, Hu Bo, et al. An evaluation method for insulation state of large generator stator bar based on support vector machine with hybrid kernel function [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 44-50.
- [10] Liu Xuezhong, Wang Jingna, Zhang Rui, et al. Electrical tree characteristics under AC and repetitive pulse voltages in wind turbine generator composite insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 1007-1014.
- [11] 刘石, 仲继泽, 冯永新, 等. 使用磁流变阻尼器的大型汽轮发电机定子端部绕组振动控制 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 39-43.
- Liu Shi, Zhong Jize, Feng Yongxin, et al. Magneto rheological technology of vibration isolation for stator end-winding of large generators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 39-43.
- [12] Nair R P, Vishwanath S B. A novel approach to identify slot discharges in the presence of end winding corona discharges [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1385-1393.
- [13] 刘凌, 张宇, 靳东松, 等. 金属杂质侵蚀下的大型发电机定子线棒绝缘劣化机理 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 104-111.
- Liu Ling, Zhang Yu, Jin Dongsong, et al. Mechanism of insulation deterioration of large generator stator bars eroded by metal impurities [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 104-111.
- [14] 高俊国, 孟睿潇, 胡海涛, 等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3065-3074.
- Gao Junguo, Meng Ruixiao, Hu Haitao, et al. Research progress on prediction of aging life of motor stator insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3065-3074.
- [15] Nair R P, Vishwanath S B. The applicability of very low frequency diagnostic testing in the evaluation of thermally aged stator coil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1223-1230.
- [16] 张跃, 梁智明, 周进, 等. 大型水轮发电机定子绕组端部电场分布仿真及试验研究 [J]. 大电机技术, 2019(2): 9-13.
- Zhang Yue, Liang Zhiming, Zhou Jin, et al. Simulation and experimental research on electric field distribution of large hydro-generator stator end winding [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(2): 9-13.
- [17] 刘剑, 汪江昆, 徐晖, 等. 大型水轮发电机定子绕组端部电场分布特性研究 [J]. 大电机技术, 2021(5): 8-14.
- Liu Jian, Wang Jiangkun, Xu Hui, et al. The research on the distribution characteristics of electric field at the end of stator winding of large hydro-generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(5): 8-14.
- [18] 胡海涛. 大型水轮发电机定子绝缘电场分布的数值仿真与结构优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [19] Wheeler J C G, Gully A M, Baker A E, et al. Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(2): 5-11.
- [20] Li Weili, Su Ying, Liu Wenmao, et al. Heat transfer analysis of an air-cooled turbine generator stator under ground-wall insulation multi-direction shelling [J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56(8): 2413-2423.
- [21] 张芳芳. 大电机定子线圈端部防晕特性损耗仿真分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.

(下转第 238 页)

- 络的翼型失速颤振预测 [J]. 力学学报, 2024, 56(3): 626-634.
- Xi Ziyang, Dai Yuting, Huang Guangjing, et al. Airfoil stall flutter prediction based on DeepONet [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(3): 626-634.
- [20] 尹掀浪, 苏晶晶, 张升, 等. 基于 PI-DeepONet 算法与稀疏测点数据的两类饱和软土固结行为预测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(10): 4542-4552.
- Yin Xianlang, Su Jingjing, Zhang Sheng, et al. Prediction of two types of saturated soft soil consolidation behavior based on the PI-DeepONet algorithm and sparse measurement data [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(10): 4542-4552.
- [21] 黄子杰. 基于深度算子网络的非饱和土壤水分运动模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2024: 17-24.
- [22] 王非凡. 基于深度算子网络的飞行器热防护不确定性量化分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2024: 33-35.
- [23] 陈思, 盛戈俾, 张立静, 等. 基于绕组等效热参数的干式变压器温度场分布快速仿真方法 [J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 97-109.
- Chen Si, Sheng Gehao, Zhang Lijing, et al. Fast simulation method of temperature field distribution for dry-type transformer based on equivalent thermal parameters of windings [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 97-109.
- [24] 李元, 陈智秋, 刘志濠, 等. 伴随网格自适应剖分优化变压器内部温度仿真模型计算效率方法 [J]. 西安交通大学学报, 2026, 60(3): 166-174.
- Li Yuan, Chen Zhiqiu, Liu Zhihao, et al. Adjoint-based adaptive mesh refinement method for optimizing computational efficiency of transformer internal temperature simulation models [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60(3): 166-174.
- [25] Wang Jiangyu, Peng Xingjie, Chen Zhang, et al. Surrogate modeling for neutron diffusion problems based on conservative physics-informed neural networks with boundary conditions enforcement [J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 176: 109234.
- (编辑 武红江)

~~~~~

(上接第 227 页)

- [22] 王新, 杨敏, 金泱, 等. 基于热老化的发电机定子线棒局部放电特性研究 [J]. 绝缘材料, 2021, 54(4): 58-63.
- Wang Xin, Yang Min, Jin Yang, et al. Partial discharge characteristics of typical defects in generator stator after thermal ageing [J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 58-63.
- [23] 陈向荣, 黄小凡, 王启隆, 等. 温度和频率对环氧树脂/碳化硅晶须复合材料交流非线性特性的影响 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3897-3912.
- Chen Xiangrong, Huang Xiaofan, Wang Qilong, et al. Effect of temperature and frequency on AC nonlinear properties of epoxy resin/silicon carbide whisker composites [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3897-3912.
- [24] GB/T 311.1—2012 绝缘配合 第 1 部分: 定义、原则和规则 [S].
- [25] 赵禹来. 模拟高海拔大气条件发电机定子绕组电晕起始电压研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- (编辑 武红江)