

风电机组除冰电缆发热的数值与实验研究

何先照, 陈中亚, 吴 炜, 任旦元, 毛涵韬, 杨德芳

(浙江运达风电股份有限公司, 浙江省风力发电技术重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对风电机组桨叶除冰系统供电电缆的散热问题, 通过数值模拟和实验, 研究了某风电机组型齿轮箱中心孔加装除冰电缆后电缆束的发热温升特性。结果表明: 风电机组持续满功率运行, 当齿轮箱油温维持在最大 65 °C 时, 在除冰系统以最大功率 87 kW (690 V) 持续运行 2 h 和 5 h 之后, 齿轮箱中心孔电缆截面最高温度分别为 97 °C 和 101 °C, 轮毂供电电缆截面最高温度分别为 93 °C 和 96 °C。除冰供电电缆满足电缆的长期运行安全温度 (≤ 150 °C)。在除冰系统运行 2 h 之后, 轮毂供电电缆已超出电缆的长期运行安全温度 (≤ 90 °C) 75 min, 其余电缆满足温度要求。模拟计算的电缆温度和实验测试的电缆温度变化规律基本一致, 电缆长时间通电、温度稳定后, 仿真计算温度和实验测试温度相近, 偏差在 2 °C 左右, 说明仿真计算方法用于电缆发热温升计算具有较高的可靠性。

关键词: 风电机组; 除冰系统; 电缆; 散热; 数值分析; 实验测试

Numerical and experimental study on the heating of deicing cable for wind turbine

HE Xianzhao, CHEN Zhongya, WU Wei, REN Danyuan, MAO Hantao, YANG Defang

(Key Laboratory of Wind Power Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the problem of power supply cable heat dissipation for the blade de-icing system on wind turbine, the method of numerical simulation and experimental test were adopted to study the characteristics of heating and temperature rise of the cable bundle with time after installing deicing cable in the center hole of gearbox of a wind turbine model. The results show that when the fan continues to operate at full power, assuming that the gearbox oil temperature is maintained at a maximum of 65 °C, after the deicing system continues to operate at a maximum power of 87 kW (690 V) for 2 hours and 5 hours, the maximum temperature of the cable section at the center hole of the gearbox is 97 °C and 101 °C respectively, and the maximum temperature of the hub power supply cable section is 93 °C and 96 °C respectively. The de-icing power supply cable shall meet the long-term operating safety temperature of the cable (≤ 150 °C). After the de-icing system runs for 2 hours, the hub power supply cable exceeds the long-term safe operating temperature (≤ 90 °C) for 75 minutes, and other cables meet the temperature requirements. The variation law of cable temperature calculated by simulation is basically the same as that measured by experiment. After the cable is powered on for a long time, the temperature calculated by simulation is close to the temperature measured by experiment, and the temperature deviation is about 2 °C. This shows that the simulation calculation method is highly reliable for the calculation of cable heating temperature rise.

Key words: wind turbine; de-icing system; cable; heat dissipation; numerical analysis; experimental testing

0 引言

为保证风力发电机在低温环境下正常运行，目前需加装除冰和冰冻监测系统^[1-2]。除冰供电电缆主要给除冰系统中的鼓风电机组和加热器供电，与风电机组轮毂供电电缆、其他通信电缆构成电缆束敷设于齿轮箱空心轴中心的穿线管内。除冰电缆供电电流的大小不仅影响电缆束中其他电缆的温升，还直接决定了加热器和鼓风电机组的功率大小，进而影响除冰系统的除冰效率。为使电缆温升更小，需增大电缆的截面积，因此准确计算除冰电缆的载流量，对于提高除冰电缆的使用率及供电系统的稳定性具有极其重要的意义。

除冰电缆载流量是指含除冰电缆的电缆束在满足除冰的多种工况下稳定运行时，除冰电缆中通过的最大电流。现有技术中，对于载流量的计算主要采用国际电工委员会(IEC)计算标准 IEC 60287^[3]。该标准基于等效热路法，是一种简化的稳态解析算法，计算步骤烦琐，结果偏保守，而且具有应用条件的局限性，只能适用于单根电缆及有限的简单排布方式的集群电缆。在除冰电缆载流量计算问题中，由于存在多回路电缆热耦合问题及复杂的排布方式和边界条件，且除冰系统的控制策略具有瞬态温升问题的特征，因此标准IEC 60287的算法已经不再适用^[4]。近20年来，随着计算机技术的发展，数值模拟方法可以处理复杂边界、多种负荷效应耦合等多种无解析解的问题，因此被广泛应用于电缆温度场的模拟计算，给工程带来巨大的经济效益。文献[5]等应用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件对地下电力电缆隧道的通风散热系统进行模拟计算，分析不同换气次数工况下的散热效果和温度、速度分布；文献[6]应用有限元软件COMSOL建立了水平排列下的电缆计算模型，模拟一定环境条件下的温度场和载流量，分析覆土层(土壤、回填砂)对电缆的影响；文献[7]选取西安市东三环过灞河电缆隧道工程作为实例进行计算并模拟研究，运用Fluent三

维建模在夏季室外高温状态下，降温通风方式分别采用普通通风系统和水冷却通风系统时，对模拟电缆隧道内温度场和速度场的影响。

CFD软件采用的有限体积法是数值模拟计算方法中的一种，在给定多种工况的电缆束敷设条件、除冰策略和齿轮箱油温的条件下，对电缆束的温度场进行计算分析，具有很好的守恒性、计算模型贴近实际边界条件和数值计算过程易于收敛的优势，可以很好地解决除冰电缆载流量计算的工程问题。本文采用数值仿真的计算方法分析了某风电场除冰系统不同运行工况条件下，齿轮箱中心孔电缆束的发热温升随时间的变化规律。同时，本文将仿真计算结果与实验测试结果进行了对比分析，验证了数值仿真计算方法用于电缆发热温升计算的准确性和可靠性。

1 数值仿真方法

1.1 控制方程

流动传热过程的控制方程满足质量守恒、动量守恒和能量守恒，通过耦合求解上述方程获得速度场、温度场和压力场。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \text{grad} T \right) \quad (3)$$

式中， ρ 为密度； $\mathbf{v}$ 为速度矢量； $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切力； $\mathbf{g}$ 为重力加速度； T 为温度； p 为静压； λ 为导热系数； C_p 为定压比热容。

1.2 物理建模

齿轮箱中心孔中主要发热的电缆有两根：除冰供电电缆(690 V，规格为 $3 \times 35 + 1 \times 16 \text{ mm}^2$)和轮毂供电电缆(400 V，规格为 $3 \times 16 + 2 \times 10 \text{ mm}^2$)，如图1所示。

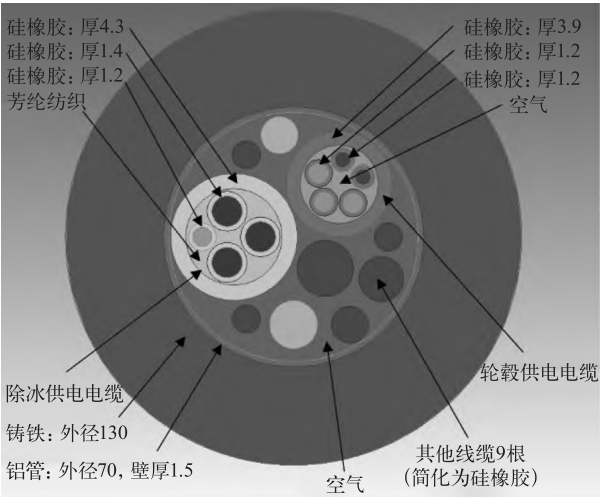


图1 电缆散热物理模型
Fig. 1 Physical model of cable heat dissipation

除冰供电电缆主要给鼓风电机组和加热器供电，最高运行功率为87 kW，计算可得最高稳定工作电流为72.8 A。因此，本次计算将除冰供电电缆电流取为75 A，根据轮毂变桨系统设计要 求，轮毂供电电缆最高稳定工作电流不大于40 A，故本次计算将轮毂供电电缆电流取为40 A。其余通信电缆电压和电流值均较小，发热量可忽略不计。

已知电缆发热量的理论计算公式为

$$Q=\rho I^2/A$$
 (4)

式中， ρ 为电阻率，铜在60℃时电阻率为 $2.06\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}^2$ ； I 为载流量，单位为A； A 为导体截面积，单位为 m^2 。

根据式（4）可以计算得到除冰系统供电电缆截面积为 35 mm^2 的单根铜芯电缆发热量为 3.3 W/m ，共3根；轮毂供电电缆截面积为 16 mm^2 的单根铜芯电缆发热量为 2.06 W/m ，共3根。

1.3 计算工况

影响齿轮箱中心孔中电缆温度的主要因素有齿轮箱油温大小、除冰电缆供电电流大小、轮毂供电电缆电流大小和电缆通电时间。其中齿轮箱油温大小、轮毂供电电缆电流大小与风电机组的运行状态有关，当风电机组停机时，齿轮箱油温随着时间的推移而降低（停机1 h预计下降到40℃以内），轮毂供电电缆无电流；当风电

组正常运行且风速小于额定风速时，齿轮箱油温最高可能达到65℃，轮毂供电电缆无电流（风速小于额定风速，变桨系统不工作）；当风电机组正常运行且风速大于额定风速时，齿轮箱油温最高可达到65℃；轮毂供电电缆最高电流为40 A（风速大于额定风速，变桨系统全功率工作）。根据除冰控制策略要求，每次除冰系统持续运行的时间为2 h，即除冰供电电缆持续通电时间为2 h。

根据以上可能出现的风电机组工作状态，列出除冰系统运行时可能出现的模拟工况1~模拟工况3，见表1。

表1 电缆温升模拟工况
Tab. 1 Simulation condition of temperature rise on cable

模拟工况	模拟运行方式	齿轮箱油温/℃	轮毂供电电缆电流	轮毂供电电缆通电时间	除冰供电电缆电流	除冰供电电缆通电时间/h
1	风电机组停机1 h/除冰系统运行	40	无	-	75 (690 V)	2
2	风速小于额定/风电机组正常运行/除冰系统运行	65	无	-	75 (690 V)	2
3	风速大于额定/风电机组正常运行/除冰系统运行	65	40 (400 V)	长时间运行温度稳定	75 (690 V)	2

1.4 边界条件

齿轮箱中心孔电缆束温升的热源来源有3个：热源1是3根截面积为 35 mm^2 的除冰供电电缆铜芯，通电时每根铜芯最高发热量为 3.3 W/m ，不通电时为0；热源2是3根截面积为 16 mm^2 的轮毂供电电缆铜芯，通电时每根铜芯最高发热量为 2.06 W/m ，不通电时为0；热源3是齿轮箱润滑油，风电机组停机1 h，润滑油温为40℃，风电机组正常运行时最高为65℃。

电缆发热模型边界条件设置如图2所示。假设电缆束沿电缆轴向的散热忽略不计，电缆通电后铜芯的发热仅沿径向传导，则除冰供电电缆通电后铜芯产生的热量通过图2中Wall1导出，最高发热量 3.3 W/m 折算为Wall1壁面边界条件为 158 W/m^2 ；

轮毂供电电缆通电后铜芯产生的热量通过图2中Wall2导出，最高发热量2.06 W /m折算为Wall2壁面边界条件为145 W/m²。由于液体与金属壁面直接对流换热的换热系数较大，图2中与齿轮箱润滑油直接接触的壁面Wall3可直接设置为润滑油温度。其余壁面设置成耦合传热，不同区域材质如图1物理模型中所示，各种材质的热物性见表2。

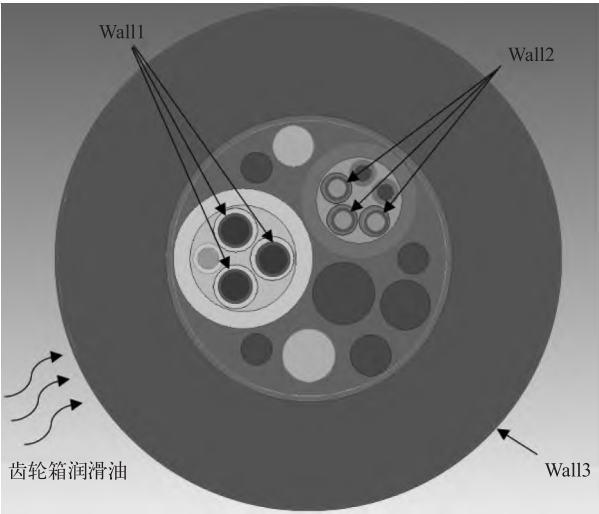


图2 电缆发热模型边界条件设置
Fig. 2 Setting of boundary conditions for cable heating model

表2 电缆发热模型截面材料热物性
Tab. 2 Thermal properties of materials on the section of cable heating model

热性能	单位	硅橡胶	芳纶编织	铜	铝	铁	空气
导热系数	W/(m·K)	0.27	0.05	390	200	60	0.028
密度	kg/m ³	1 200	1 400	8 900	2 700	8 030	1.05
比热容	J/(kg·K)	1 700	1 420	380	870	500	1 005

2 仿真结果分析

本文采用CFD软件对电缆束发热进行非稳态过程的仿真计算，即计算电缆束发热后电缆束截面温度分布随时间的变化规律，通过设置温度监测点来记录电缆束截面关键位置温度数据随时间的变化规律。图3设置了4个温度监测点。

- 1) 监测点1：除冰供电电缆铜芯最高温度。
- 2) 监测点2：轮毂供电电缆铜芯最高温度。

- 3) 监测点3：除冰供电电缆外壁最高温度。
- 4) 监测点4：轮毂供电电缆外壁最高温度。

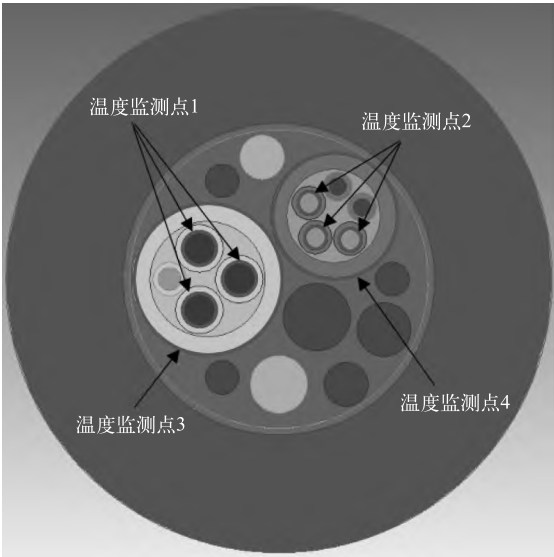


图3 电缆束温度监测点设置
Fig. 3 Setting of temperature monitoring points on cable bundle

在CFD软件中将图2模型中的Wall1设置为158 W/m²，Wall2设置为145 W/m²，Wall3设置为338 K（65 ℃），该工况为除冰系统启动运行前，风电机组已额定工况长时间运行，即轮毂供电电缆长时间通电，电缆束温度达到一个高于齿轮箱油温的稳定值。因此对模拟工况3进行仿真计算时，首先对整个模型进行338 K（65 ℃）温度初始化，设置轮毂供电电缆通电（Wall1设置为0 W/m²，Wall2设置为145 W/m²）5 h后，再开启除冰供电电缆通电（Wall1设置为158 W/m²，Wall2设置为145 W/m²）5 h。

图4～图7分别为温度监测点1～4最高温度随除冰和轮毂供电电缆通电时间的变化关系。由图4～图7可知：轮毂供电电缆通电5 h后，各监测点最高温度基本趋于稳定，监测点1～4最高温度分别为74 ℃、87 ℃、74 ℃和78 ℃，从第5 h起加载除冰供电电缆通电，继续通电2 h后，监测点1/2/3/4最高温度分别为97 ℃、93 ℃、89 ℃和88 ℃，满足除冰供电电缆的长期运行安全温度要求（≤150 ℃）。从第5 h起加载除冰供电电缆通电，继续通电5 h后，监测点1～4最高温度基本趋于稳定，最高温度为101 ℃、96 ℃、92 ℃和91 ℃。

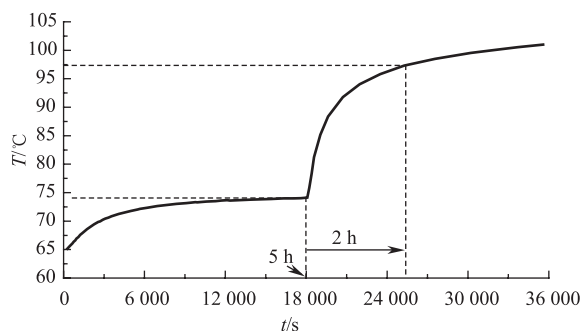


图4 监测点1最高温度随通电时间的变化关系

Fig. 4 Variation of maximum temperature at monitoring point 1 with power-on time

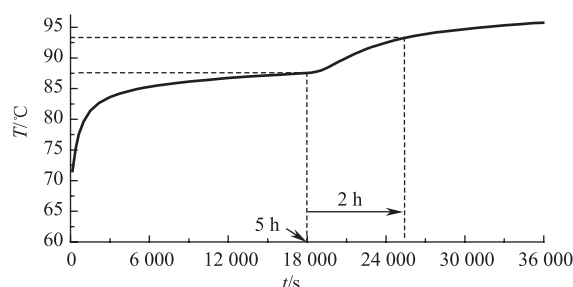


图5 监测点2最高温度随通电时间的变化关系

Fig. 5 Variation of maximum temperature at monitoring point 2 with power-on time

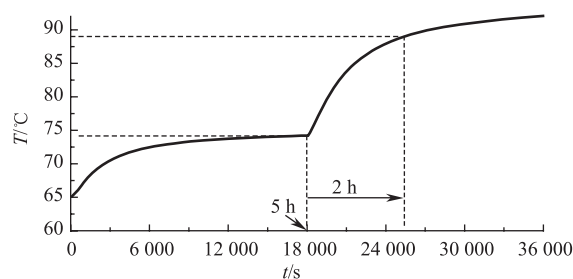


图6 监测点3最高温度随电缆通电时间的变化关系

Fig. 6 Variation of maximum temperature at monitoring point 3 with power-on time

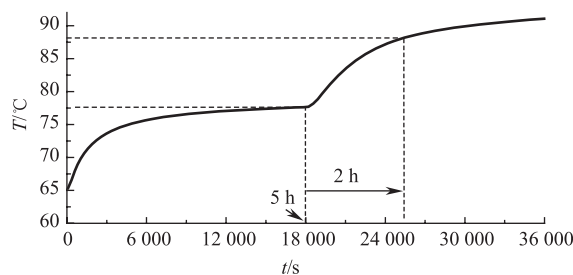


图7 监测点4最高温度随通电时间的变化关系

Fig. 7 Variation of maximum temperature at monitoring point 4 with power-on time

图8给出了轮毂供电电缆通电5 h后的电缆束截面温度云图。由图8可知,电缆束截面最高温度为87 °C,位于温度监测点3,同上文分析一致。图9给出了模拟工况3从第5 h起加载除冰供电电缆通电,继续通电30 min、60 min、90 min和120 min的电缆束截面温度云图。由图9d可知,继续通电2 h后,温度监测点1~4最高温度分别为97 °C、93 °C、89 °C和88 °C,同上文分析一致。

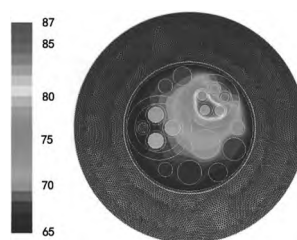


图8 轮毂供电电缆通电5 h后电缆束截面温度云图

Fig. 8 Temperature cloud diagram on the cross section of the cable bundle after the hub power cable is energized for 5 hours

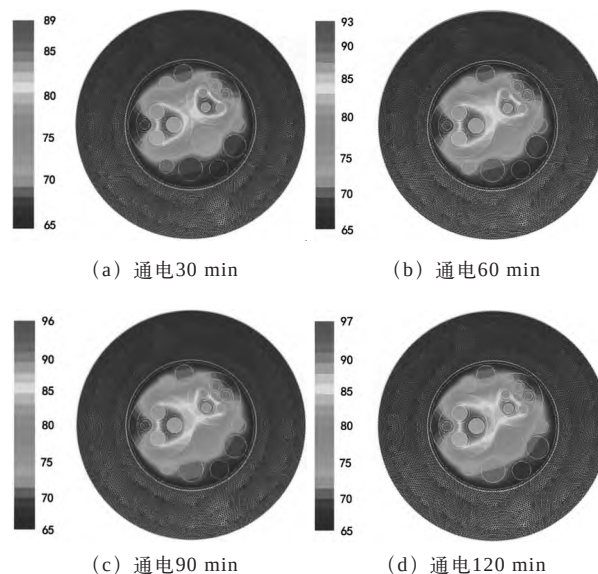


图9 第5 h起加载除冰供电电缆不同通电时间后电缆束截面温度云图

Fig. 9 Temperature cloud diagram on cross section of the cable bundle after loading deicing power supply cable from the 5th hour

3 实验测试与分析

3.1 实验测试系统

图10为电缆发热实验测试系统,由两台穿

心加热变压器（为除冰电缆和轮毂电缆加载电流）、内径70 mm的2.5 m长铝管（模拟齿轮箱中心孔）、带温度控制器的恒温加热带（模拟齿轮箱油温）、电缆束和数字测温仪组成。将数字测温仪的PT100探头粘附在中间截面②处的除冰供电电缆壁面上。

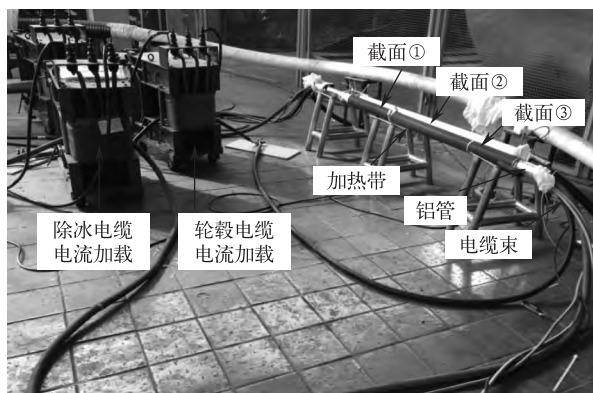


图 10 电缆发热实验测试系统
Fig. 10 Cable heating test system

3.2 实验测试工况

恒温加热带加热到65℃，除冰供电电缆加0 A电流，轮毂供电电缆加40 A电流，运行3 h。实验测试了加载轮毂供电电流后的电缆温升，并在图10中截面②位置添加了轮毂供电电缆外壁温度实时监测点。

3.3 测试结果分析

数字测温仪记录的中间截面②轮毂供电电缆外壁温度变化规律如图11所示。由图11可知，仿真计算温度和实验测试温度变化趋势基本一致，轮毂供电电缆持续通电3 h后，仿真计算和实验测试的轮毂供电电缆外壁温度基本稳定不再升高，数字测温仪显示最大温度均为78℃，仿真计算温度为76.7℃，实验测试温度和仿真计算温度仅相差1.3℃，吻合较好。

数字测温仪记录的中间截面②除冰供电电缆外壁温度变化规律如图12所示，由图12可知，仿真计算温度和实验测试温度变化趋势基本一致，轮毂供电电缆持续通电3 h后，仿真计算和实验测试的轮毂供电电缆外壁温度基本稳定不再升高，数字测温仪显示温度为75.1℃，仿真计算温

度为73.4℃，实验测试温度和仿真计算温度仅相差1.7℃，吻合较好。

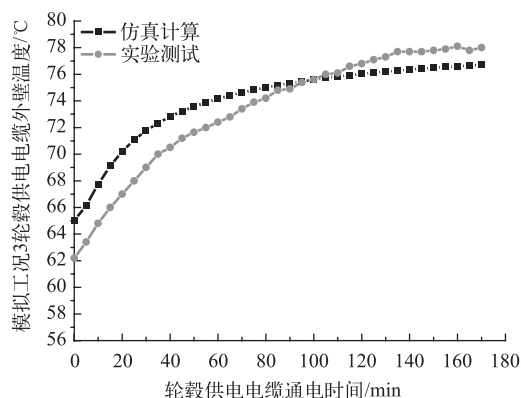


图 11 轮毂供电电缆外壁温度随通电时间的变化关系
Fig. 11 Change of outer wall temperature of hub power supply cable with power-on time

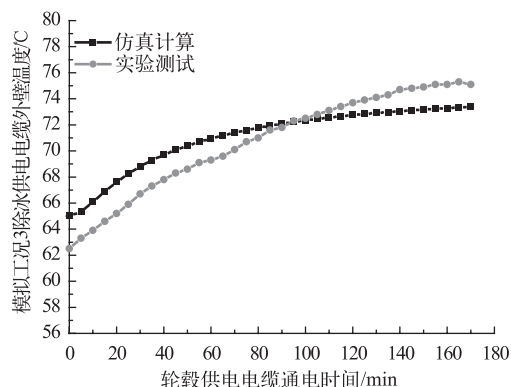


图 12 除冰供电电缆外壁温度随通电时间的变化关系
Fig. 12 Variation of outer wall temperature of deicing power supply cable with power-on time

4 结束语

针对某风场除冰技改项目，本文采用数值仿真和实验测试的方法，分析了搭载除冰系统的风电齿轮箱中心孔电缆束的发热温升随时间的变化规律。

1) 风电机组叶片结冰时，若执行不停机除冰策略，则风速持续高于额定风速，假设轮毂供电电缆已持续以最大电流工作5 h以上，齿轮箱油温维持在最大65℃时，除冰系统以最大功率87 kW（690 V）持续运行2 h和5 h：齿轮箱中心孔电缆截面最高温度为97℃（温升32℃）和101℃（温升36℃），最高温度位于与除冰

供电电缆通电铜丝接触的硅橡胶壁面，除冰供电电缆外壁面最高温度为89℃（温升24℃）和92℃（温升27℃），轮毂供电电缆截面最高温度分别为93℃（温升28℃）和96℃（温升31℃），轮毂供电电缆外壁面最高温度为88℃（温升23℃）和91℃（温升26℃）。除冰供电电缆满足电缆的长期运行安全温度（≤150℃）；除冰系统运行2 h，轮毂供电电缆已超出电缆的长期运行安全温度（≤90℃）75 min，其余电缆满足温度要求。

2) 根据仿真计算和实验测试的比较分析可知，仿真计算的电缆温度和实验测试的电缆温度变化规律基本一致，电缆长时间通电温度稳定后，仿真计算温度和实验测试温度相差不大，温度偏差在2℃左右，在误差允许范围内，说明仿真计算方法用于电缆发热温升计算具有较高的可靠性。

参考文献

[1] 陈中亚, 毛涵韬, 刘钦东, 等. 风电机组叶片热风除冰数值分析与性能优化研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(14): 8-12.

[2] 刘杰, 杨娜, 谭玉涛, 等. 基于WD-LSTM的风电

机组叶片结冰状态评测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 399-408.

[3] 段佳冰, 尹成群, 吕安强, 等. 基于IEC 60287和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 1-6.

[4] 周鑫, 张尧, 牛海清. 基于IEC 60287的电缆载流量迭代算法研究[C]. 长沙: 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会, 2009: 1-4.

[5] 张文涛, 杨士心. CFD技术在暖通空调制冷工程中的应用[J]. 城市建设理论研究, 2015, 36(5): 25-27.

[6] 胡康, 赵德宁, 吴劲松, 等. 地下电力电缆隧道通风系统的模拟计算[J]. 电力勘测设计, 2020(6): 55-60.

[7] 王爽. 长距离电缆隧道通风系统模拟研究及优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.

作者简介

何先照（1984—），男，高级工程师，主要从事风力发电机组传动链设计方面的研究。

（收稿日期：2023-04-14）