

分裂导线温度分布特性研究

赵新宇¹, 贾振宏¹, 张瑞永¹, 姚成¹, 彭庆军², 王晓静³, 周天春⁴

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 4. 电力规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 深入开展分裂导线温度分布特性研究, 对提高输电线路导线的设计水平具有重要的工程意义。为此, 基于空气动力学方程和热力学方程建立导线温度分布计算模型, 计算模型与IEEE 738计算方法、CIGRE WG22.12计算方法以及试验数据是一致的, 研究发现: LGJ-400/35 型导线四分裂在海拔高度 $H=0$ m 的情况下, 导线之间的温度不平衡等效于单根导线载流量增加6%~7%, 而六分裂时这个等效超过了10%。随着海拔高度的增加, 分裂导线之间的温度不平衡程度进一步加剧。

关键词: 空气动力学; 热力学; 有限元; 分裂导线温度分布

Study of the characteristics of a split conductor temperature distribution

ZHAO Xinyu¹, JIA Zhenhong¹, ZHANG ruiyong¹, YAO Cheng¹, PENG Qingjun², WANG Xiaojin³, ZHOU Tianchun⁴

(1. CEEC Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650217, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 4. Electric Power Planning and Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: To further research on the characteristics of a split conductor temperature distribution is of great significance for raise the level of the design of the transmission line. Therefore, based on the aerodynamics equation and the thermodynamic equation, the wire temperature distribution calculation model is established. Through the calculations and experiments analysis, it is found that conductor temperature distribution obtained in the present work agree well with those of IEEE 738 calculation method and CIGRE WG22.12 calculation method. The study found that: the temperature deviation ΔT caused by different position in the four-split transmission wire with LGJ-400/35 wire and the six-split transmission wire with LGJ-400/35 wire is respectively equivalent to the increase of temperature caused by conductor carrying capacity increased about 6%~7% and more than 10% at $H=0$ m. The temperature deviation ΔT of split-conductor increases with the increase of altitude.

Key words: air dynamic equation; thermodynamic equation; finite element method; the temperature distribution of split transmission wire

中国电机工程学会青年人才托举工程 (JLB-2017-288); 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项高重复频率高压脉冲源研制与产业化项目 (2017YFF0104300); 中国博士后科学基金资助 (2014M552552XB)

0 引言

提升输电容量的方式有提高电压等级、改变电网的运行调度和控制方式^[1-2]、新型导线材质^[3-9]以及设计技术的提升,其中前面的三种目前均取得了较大的进展,如电压等级已经达到了1 000 kV^[10]和1 100 kV^[11],但是对导线的设计选型相关研究相对滞缓,主要体现在目前导线的设计载流量的计算主要是参考国家标准(GB 50545)^[12]与CIGRE模型^[13]、IEC 61597模型、IEEE 738模型^[14]以及英国Morgan公式,这些标准均是稳态热平衡方程^[15],即温度场的代数方程(以GB 50545为典型的代表)和温度场的常微分方程(以CIGRE模型、IEEE 738模型为典型的代表),且对空气动力学方程作了近似处理,这在一定程度上简化了计算量,由于计算模型的简化,即上述计算模型均不考虑导线空间几何分布特性,计算基本是针对单根导线开展的,这导致了上述模型无法处理或计算分析分裂导线中导线温度分布之间的差异特性,目前这种分裂导线之间温度偏差也鲜有报道。为此本文将基于空气动力学方程和热力学方程建立的导线温度分布计算偏微分方程模型,并基于此计算模型开展分裂导线之间的问题偏差研究。

1 计算模型

1.1 控制方程

由于温度场对流场的影响近似可以忽略,因此空气流体控制方程可以采用稳态形式^[16],即

$$\begin{cases} \rho_{\text{air}}(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot [-p \cdot \vec{I} + \nabla(\vec{u}\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T)] \\ \frac{\partial \rho_{\text{air}}}{\partial t} + \rho_{\text{air}} \nabla \cdot (\vec{u}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

热力学方程为^[17]

$$\begin{cases} d_z \rho_{\text{air}} C_{p,\text{air}} \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho_{\text{air}} C_{p,\text{air}} \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (d_z k \nabla T) + d_z Q \\ d_z \rho_{\text{wire}} C_{p,\text{wire}} \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho_{\text{wire}} C_{p,\text{wire}} \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (d_z k \nabla T) + d_z Q \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$Q = Q_1 + Q_{\text{sun}} - Q_{\text{con}} - Q_{\text{rad}} \quad (3)$$

式中, ρ_{air} 为导线周围空气密度; $\vec{u}$ 为导线周围空气流速; p 为导线周围空气压强; $\vec{I}$ 为单位矢量; $C_{p,\text{air}}$ 为导线周围空气比热容; C 为空气或导线的温度; d_z 为导线的轴向距离; $C_{p,\text{wire}}$ 为导线的比热容; Q_1 为导线通过电流自身产生的热量; Q_{sun} 为因日照作用而产生的热量; Q_{con} 为导线对流散热的热量; Q_{rad} 为导线辐射的散热量,且满足斯蒂芬-玻尔兹曼辐射定律。

本文采用二维的模型,对应的各个方程的边界条件参考文献[18]。

1.2 网格参数和计算平台

由于本文是流场和温度场耦合计算,为此本文采用计算耦合场比较成熟的处理多物理场耦合计算软件COMSOL Multiphysics®4.1平台。

基于有限元方法的流体力学方程求解时,求解域进行合理的网格划分是能否正确求解的关键,尤其是在那些物理量(如温度、密度^[19]和速度梯度)较大的区域,网格的划分是比较重要的^[20]。上述模型中,导线附近是温度、密度和速度的梯度较大区域,故对此区域网格进行合理的加密,如图1、图2所示。

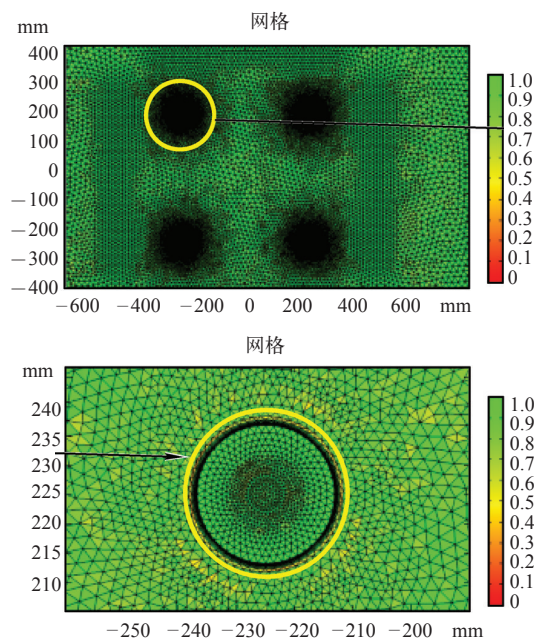


图1 四分裂导线网格单元质量

Fig. 1 Quality of mesh element of the four-split transmission wire

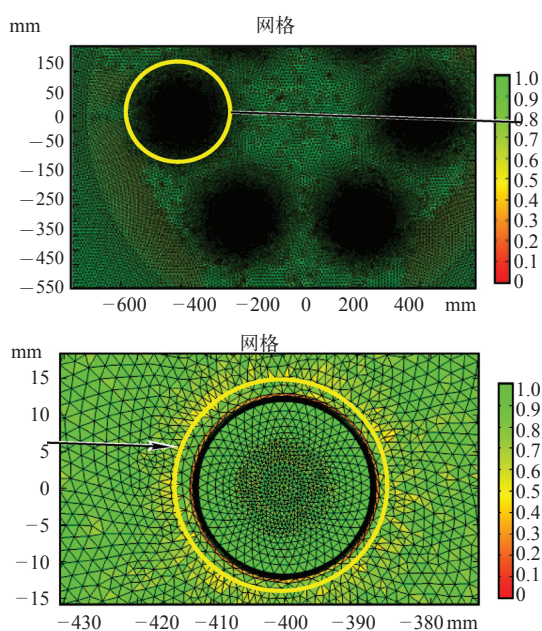


图2 六分裂导线网格单元质量

Fig. 2 Quality of mesh element of the six-split transmission wire

网格单元质量是衡量网格好坏的重要参数，其中最好为1，而当单元质量小于0.1时，其求解的结果难以收敛^[21]。根据图1、图2可以看出，本文划分的单元质量都大于0.1。为直观地表述出本文所采用的网格情况，下表中给出了求解域网格参数，根据下表可以看出，无论是四分裂导线还是六分裂导线，本文所采用的网格单元平均质量都大于0.8，而最小的网格单元质量都大于0.1。

表 网格参数统计

Tab. Mesh statistics.

	四分裂导线网格参数	六分裂导线网格参数
三角单元数目	51 888	124 546
四边形	1 664	2 496
边界单元数目	1 028	1 128
最小单元质量	0.143 5	0.110 6
平均单元质量	0.881 6	0.893 4
单元面积比	1.537×10^{-4}	5.92×10^{-4}
网格面积/mm ²	3.141×10^8	3.141×10^8
网格顶点	27 765	65 020

2 计算模型的可靠性分析

2.1 计算模型的可靠性分析

为了便于后面的分析，首先分析本文计算模型的可靠性，图3为LGJ-400/35型导线从开始通入静态热整定电流577 A到导线温度稳定时的变化规律^[22]，其中相关环境参数如下：环境温度为40℃，日照强度 J_s 取值为1 000 W/m²，导线表面的辐射散热系数 E 取0.9，导线表面吸热系数 α_s 取0.9，玻尔兹曼常数 S 取值 5.67×10^{-8} W/m²；根据文献计算分析在上述条件下LGJ-400/35型导线的静态热定值约为577 A (70℃)^[22]，这与本文计算的577 A (71.99℃)的温度误差为2.84%。

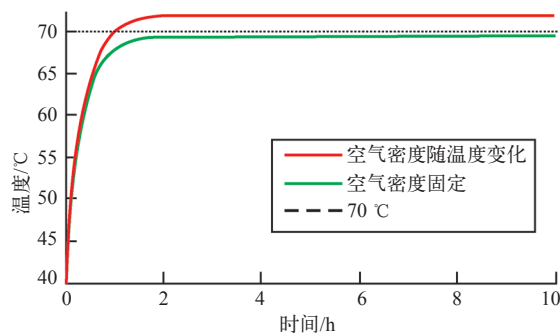


图3 不同空气密度下的导线温度

Fig. 3 Conductor temperature of $I=577$ A and $u=0.5$ m/s under different air densities

产生这个误差的主要原因如下：①本文的模型中除了热力学传导方程之外，还耦合空气动力学方程；②本文考虑的空气密度随温度的变化如图4所示，如果空气密度不随温度变化时，计算值为577 A (69.37℃)，对应的温度差为0.9%。综上所述，该计算方法与IEEE推荐的计算方法是一致的，且同时还考虑了空气密度随温度变化的规律。

2.2 试验数据与模型计算值的对比分析

本文结合试验分析了400/35 mm²的钢芯铝绞线在不同的风速(0.8 m/s、1.0 m/s或1.1 m/s)下的温度分布情况，其中环境温度为24℃，导线 $I=505$ A，并分别利用IEEE 738计算方法、CIGRE WG22.12计算方法和本文提出的有限元

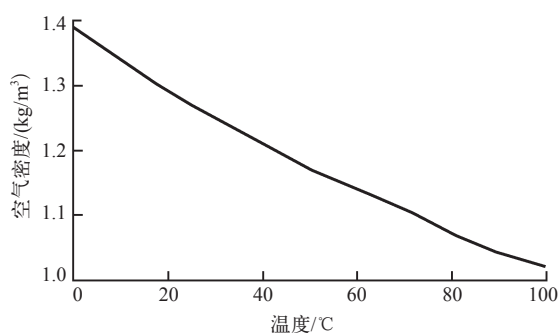


图4 空气密度随温度的变化规律

Fig. 4 The variation of air density with temperature

方法进行计算分析,如图5~图7所示,考虑到试验环境中无阳光,故日照强度 J_s 取值为 0 W/m^2 ,试验数据每10~20 min读取一次温度数据,待温度数据连续1 h基本无变化时认为导线达到热稳定。可以发现本课题提出的计算模型在热稳定阶段与IEEE模型1 000 m海拔下的计算值较为接近,根据图5~图7可以看出,在温度上升阶段,IEEE 738计算方法和CIGRE WG22.12计算方法计算结果均偏大,本文提出的有限元方法FEM计算的温度分布曲线与试验曲线较为吻合。

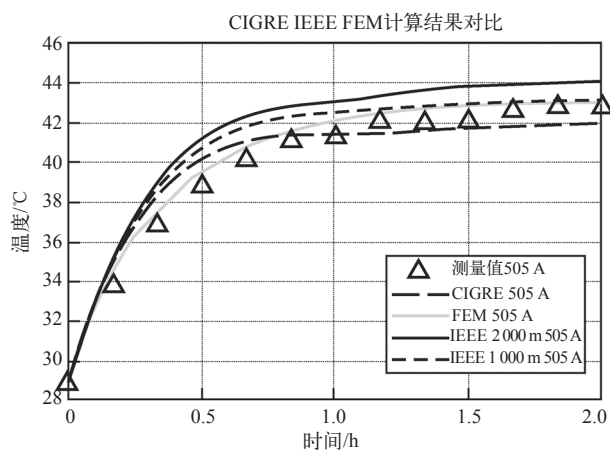


图5 计算值与测量值关系图(0.8 m/s)

Fig. 5 The relationship between the calculated value and the measured value(0.8 m/s)

3 分裂导线温度分布分析

3.1 四分裂导线

400/35 mm²的钢芯铝绞导线四分裂,分裂距离为450 mm,风速为0.5 m/s,导线的布置界面图如图8所示,风向从2[#]、4[#]导线吹向1[#]、3[#]导

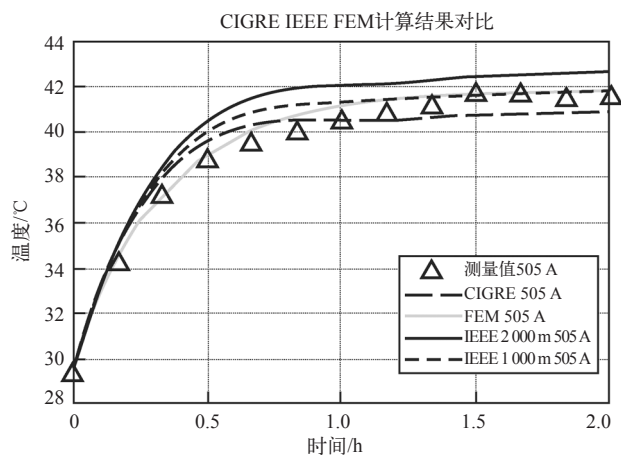


图6 计算值与测量值关系图(1.0 m/s)

Fig. 6 The relationship between the calculated value and the measured value(1.0 m/s)

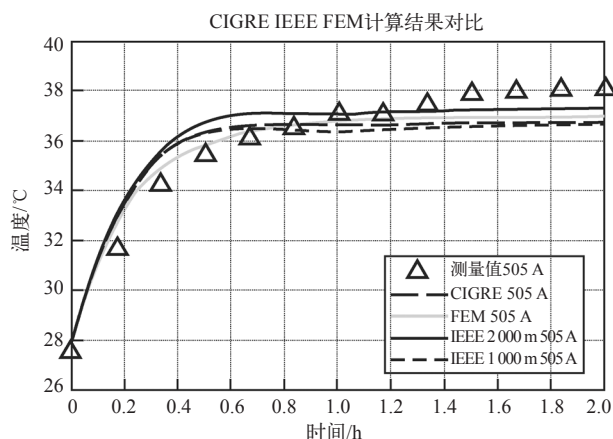


图7 计算值与测量值关系图(1.1 m/s)

Fig. 7 The relationship between the calculated value and the measured value (1.1 m/s)

线。图9为导线电流时导线的温度分布情况,可以看出2[#]、4[#]导线产生的热流将对1[#]、3[#]导线有影响。从图10中可以看出,1[#]、3[#]导线温度高于2[#]、4[#]导线的温度,两组导线的温度差如图11所示,最大温差约为2.52 K,当导线载流量增加7%,即623.8 A时,1[#]、3[#]导线温度增加约2.92 K;而2[#]、4[#]导线温度增加约2.67 K,可以看出在载流量一定时(583 A)分裂导线之间的偏差等效为单根导线载流量增加6%~7%,且这种分裂导线间的温度差会随着载流量的增加而逐渐加大。导线载流增加10%时,1[#]、3[#]导线与2[#]、4[#]导线温度差约为2.86 K,即温度差相比583 A的增大13.5%。当海拔高度 $H=2\ 000 \text{ m}$ 时,这

个温度差分别达到了2.95 K ($I=583$ A) 和3.39 K ($I=641.3$ A), 即温度差分别增大为17.0%和18.5%, 温度差进一步加剧。

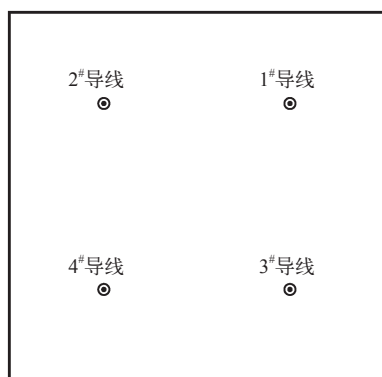


图8 四分裂轴截面图

Fig. 8 Wire distribution over the axial cross section in four-split transmission wire

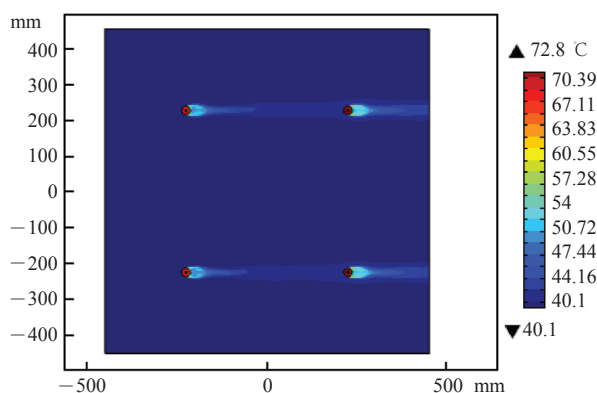


图9 四分裂轴截面温度分布 ($H=0$ m)

Fig. 9 Wire temperature distribution over the axial cross section in four-split transmission wire ($H=0$ m)

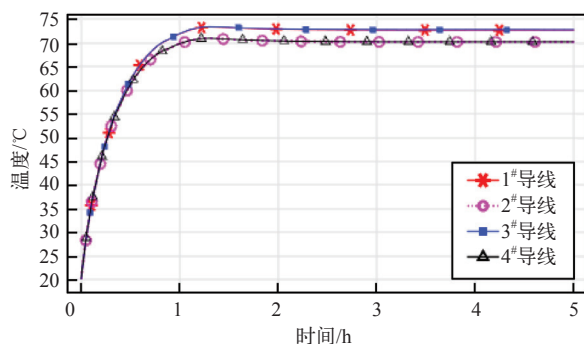


图10 四分裂导线表面温度分布 ($H=0$ m)

Fig. 10 Wire surface temperature distribution in four-split transmission wire ($H=0$ m)

3.2 六分裂导线

400/35 mm²的钢芯铝绞导线六分裂, 分裂

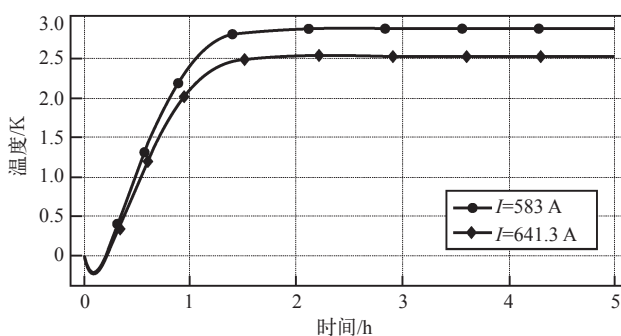


图11 1#导线与2#导线 (或者3#导线与4#导线) 温度差 ($H=0$ m)

Fig. 11 The temperature difference between the first-conductor and the second-conductor (or between the third-conductor and the fourth-conductor) ($H=0$ m)

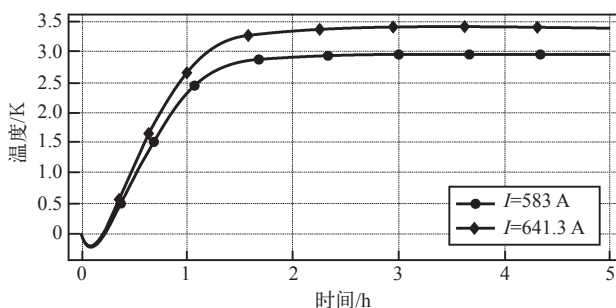


图12 1#导线与2#导线 (或者3#导线与4#导线) 温度差 ($H=2\ 000$ m)

Fig. 12 The temperature difference between the first-conductor and the second-conductor (or between the third-conductor and the fourth-conductor) ($H=2\ 000$ m)

距离为400 mm, 风速为0.5 m/s, 导线的布置界面图如图13所示, 风向从1#、5#和6#导线侧吹向2#、3#和4#导线侧。图14为导线电流时导线的温度分布情况, 根据风速的方向性, 六分裂导线中1#、5#导线对称, 2#、4#导线对称, 因此六分裂导线的温度差分为两组情况, 如图15a所示, 分别是海拔高度 $H=0$ m, 电流 $I=583$ A, 1#导线与2#导线 (或者4#导线与5#导线)、3#导线与6#导线温度差, 温差分别为3.30 K和1.63 K, 且当电流增加10%时, 温差分别为3.78 K和1.87 K, 如图15b所示。对比图15a、b可以看出, 温差增加了14.5%和14.7%。1#导线与2#导线 (或者4#导线与5#导线) 温度差比导线容量增加7%时, 温度增大 (2.92 K) 13.0%, 且这种偏差随着海拔高度的增加进一步扩大。如图15c、d所示, 海拔高度 $H=2\ 000$ m, 电流 $I=583$ A, 1#导线与2#导线 (或

者4[#]导线与5[#]导线)、3[#]导线与6[#]导线温度差,温差分别为3.91 K和2.04 K,相比 $H=0$ m同电流的温差增大18.5%和25.2%。海拔高度 $H=2\ 000$ m,电流 $I=641.3$ A,1[#]导线与2[#]导线(或者4[#]导线与5[#]导线)、3[#]导线与6[#]导线温度差,温差分别为4.49 K和2.34 K,相比 $H=0$ m同电流的温差增大18.8%和25.1%。对比四分裂的情况可以发现,由于六分裂导线间距变小,这种温度平衡度进一步加剧。

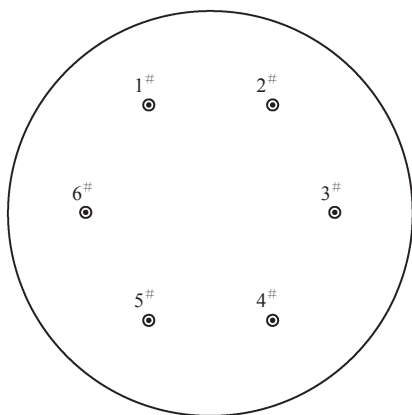


图 13 六分裂轴截面图

Fig. 13 Wire distribution over the axial cross section in six-split transmission wire

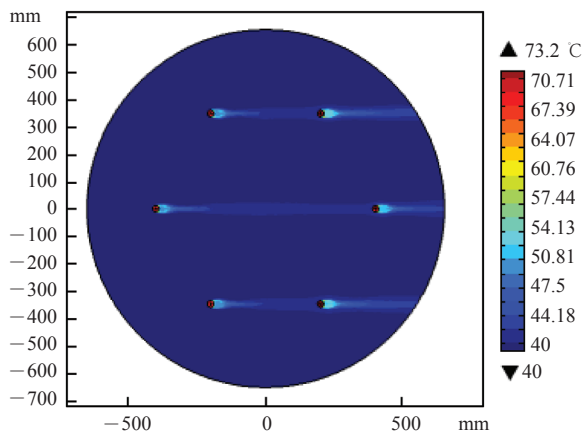


图 14 六裂轴截面温度分布

Fig. 14 Wire temperature distribution over the axial cross section in six-split transmission wire

4 结束语

本文基于有限元方法开展了分裂导线温度分布特性研究,通过对LGJ-400/35型导线四分裂、六分裂情况研究发现:

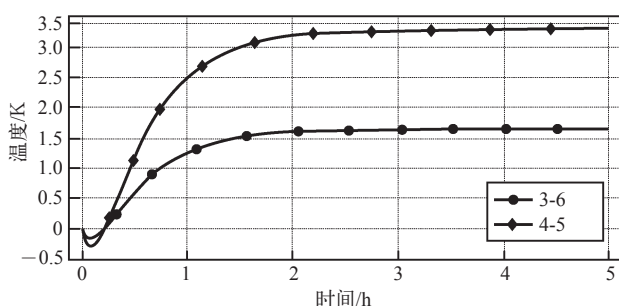
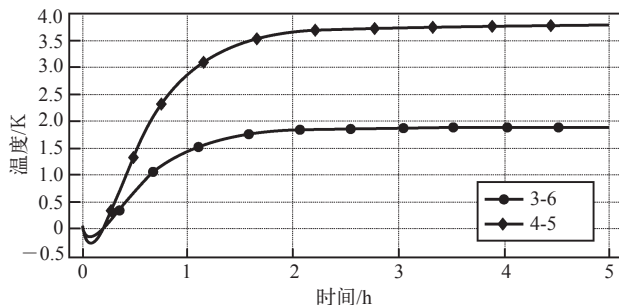
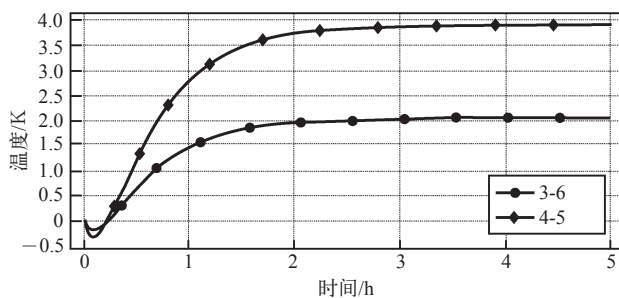
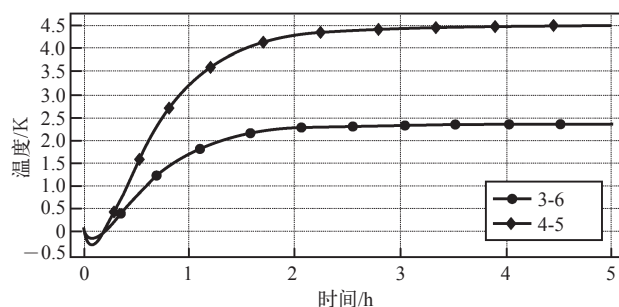
(a) 海拔高度 $H=0$ m, 电流 $I=583$ A(b) 海拔高度 $H=0$ m, 电流 $I=641.3$ A(c) 海拔高度 $H=2\ 000$ m, 电流 $I=583$ A(d) 海拔高度 $H=2\ 000$ m, 电流 $I=641.3$ A图 15 1[#]导线与2[#]导线(或者4[#]导线与5[#]导线)、3[#]导线与6[#]导线温度差

Fig. 15 The temperature difference between the first-conductor and the second-conductor(or between the fourth-conductor and the fifth-conductor), between the third-conductor and the sixth-conductor

1) LGJ-400/35型导线四分裂在海拔高度 $H=0$ m的情况下,导线之间的温度不平衡等效于单根导线载流量增加6%~7%,而六分裂时这个

等效超过了10%。

2) 随着海拔高度的增加, 分裂导线之间的温度不平衡程度进一步加剧。

3) 在单根导线情况下, 本文提出的有限元方法的计算结果与IEEE 738计算方法、CIGRE WG22.12计算方法以及试验数据是一致的, 同时本文给出的计算方法可以分析分裂导线之间的温度不平衡特性。

参考文献

- [1] 张宁. 提高特高压电网输电能力研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [2] 林成, 马覃峰, 王寅, 等. 基于改进Shapley值的输电网网损优化与分摊方法[J]. 电气应用, 2018, 37(7): 70-74.
- [3] 袁贝尔, 应展烽, 齐保军, 等. 高压碳纤维复合芯导线输电线路热过载运行的风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 111-117.
- [4] 杜巍, 王大朋. 碳纤维复合芯导线在高压架空输电线路中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(增刊).
- [5] 汪从敏. 碳纤维复合芯导线深化试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [6] ZHANG W, ZHOU Z, XIE F, et al. Stress and sag calculation of the carbon fiber composite core conductor in continuous spans[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2014(4): 39-43.
- [7] 龚延兴, 杨静, 江大林, 等. 光纤复合导线在110~220 kV线路上施工关键技术研究[J]. 电气应用, 2013, 32(增刊2): 406-409.
- [8] 杨宁. ACCC碳纤维复合芯导线技术在我国的应用前景分析[J]. 电气应用, 2008, 27(5): 50-52.
- [9] 张鹏, 李忠全, 李宁. 碳纤维导线在全球能源互联网跨洲输电走廊中的经济性分析[J]. 电气应用, 2016, 35(21): 84-88.
- [10] 王长军. 1000 kV交流输电线路故障过电压研究[J]. 电气应用, 2012, 31(12): 79-81.
- [11] 章文俊, 钱毅, 张凤新, 等. 准东—华东±1100 kV特高压送端换流站接地极及接地极线路规划[J]. 电气应用, 2016, 35(15): 66-69.
- [12] 廖宗高, 傅鹏程. IEC、ASCE、GB50545规范风荷载计算对比与分析[J]. 电力勘测设计, 2011(3): 59-63.
- [13] CIGRE WG22.12 The thermal behavior of overhead conductor[S]. 2002.
- [14] MURATORI B D. 738-2012-IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S].
- [15] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 等. 电力电缆载流量计算的方法与发展[J]. 电气应用, 2010, 29(3): 26-31.
- [16] 栗弗席兹. 物理动理学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [17] SIMA W, PENG Q, YANG Q, et al. Study of the characteristics of a streamer discharge in air based on a plasma chemical model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 660-670.
- [18] 任君鹏, 王栋, 杜志叶, 等. 强迫空气冷却高压开关柜三维气流-温升仿真分析[J]. 高压电器, 2017(10): 12-18.
- [19] SIMA W X, PENG Q J, YANG Q, et al. Study of the characteristics of a streamer discharge in air based on a plasma chemical model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 660-670.
- [20] 张辉, 韩学山, 王艳玲. 架空输电线路运行载流量分析[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 31-35.

作者简介



赵新宇

赵新宇(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压输电线路设计。

(收稿日期: 2020-04-03) **EA**