

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201560

基于有限元的低风压导线发热分析

魏建华¹, 赵文彬¹, 李敏², 党朋^{3,4}, 姚远¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090;
3. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200093; 4. 特种电缆技术国家重点实验室, 上海 200093)

摘要: 架空输电线路作为电力系统的重要组成部分, 能否安全运行直接影响到供电可靠性。低风压导线作为一种新型导线, 降低了输电线路在大风工况下的风压, 对架空输电线路安全运行具有重要意义。导线温度是限制线路输送容量的主要因素, 为了对该导线进行更全面的评估, 利用有限元仿真电磁-流固传热多物理场耦合模块, 搭建导线与周围空气域模型。考虑到绞线内部气隙及集肤效应和日照生热对导线径向温度分布的影响, 采用将热源按层进行划分的方法, 对低风压导线与常规导线在自然对流和强制对流两种情况下的温度特性进行对比分析。结果表明: 导线的低风压构造使得在相同工况下的径向温差比常规导线要小很多, 且基本不受对流条件的影响, 而铝截面积的增加使得在相同载流量下发热减少, 整体温度也低于常规导线。

关键词: 低风压导线; 有限元分析; 温度分布; 径向温差

Heating analysis of a low-wind-pressure conductor based on finite elements

WEI Jianhua¹, ZHAO Wenbin¹, LI Min², DANG Peng^{3,4}, YAO Yuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. Shanghai Electric Cable Research Institute, Shanghai 200093, China; 4. The State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The safe operation of an overhead transmission line directly affects the reliability of power supply. The low-wind-pressure conductor is a new type which reduces the wind pressure of a transmission line under strong winds. It is of great significance to the safe operation of overhead transmission lines. The temperature of the conductor is the main factor limiting the transmission capacity of the line. For a more comprehensive evaluation, a multi physical field coupling module of electromagnetic fluid solid heat transfer is simulated by the finite element method, and the model of conductor and surrounding air domain is built. Considering the air gap and skin effect in the strand and the influence of sunshine heat generation on the radial temperature distribution of the conductor, the heat source is divided by layer. The temperature characteristics of the low wind pressure conductor and conventional conductor under natural convection and forced convection are compared and analyzed. The results show that the low-wind-pressure structure of the conductor makes the radial temperature difference much smaller than that of the conventional conductor under the same working conditions, and is basically not affected by the convection conditions. The increase of aluminum cross-sectional area reduces the heating under the same current carrying capacity, and the overall temperature is lower than that of a conventional conductor.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52005315).

Key words: low-wind-pressure conductor; finite element analysis; temperature distribution; radial temperature difference

0 引言

导线所受风压占整个输电线路中的 50% 以上,

对基础和杆塔本体的强度设计以及档距的选择有着重要影响, 电力电缆线路尤其是高压电缆线路的运行可靠性将直接影响到城市电网整体安全^[1-5]。随着我国经济飞速发展, 人们生产生活对电能的需求日益渐增, 新建输电线路走廊用地紧张, 对原有输电

线路升级改造,提升输电线路的传输能力缓解电力供求矛盾迫在眉睫^[6-7]。动态增容技术通过对运行输电线路导线温度和环境气象、导线弧垂参数进行监测,尽可能地增加线路载流量^[8]。文献[9]借助优化后的载流量计算模型对导线温度进行测算,并将该方法集成到智能电网在线监测中。文献[10]在环境温度和覆冰厚度一定的条件下,覆冰导线外表面温度随对流换热系数的增大而降低,减少了输电线路覆冰对电网安全的影响。文献[11]利用电热耦合模型对事故反演,提出了输电线路的安全温升裕度和弧垂超限预警方法。通过对架空导线外表温度的监测及内部最大温度仿真计算,对线路隐含载流量进行评估,使输电线路输送能力最大化^[12-13]。

早在 20 世纪 70 年代,已有学者开展了低风压导线的研究,并成功开发了低风压 ACSR 导线。我国开展低风压导线的研究较晚,文献[14]对新型同心绞导线风阻系数进行了风洞测试,结果表明:与常规的钢芯铝绞线不同,这种低风压导线的风阻系数随风速的增大而减小。文献[15-18]对不同结构的低风压导线展开研究并申请了相关专利。

目前,对低风压导线的研究多限于风阻特性上,为了更全面地对低风压导线的性能进行评估,采用有限元法对低风压导线在相同条件下与常规导线的温度特性进行分析对比,为推广低风压导线在温度特性以及线路动态增容能力方面的应用提供参考^[19-20]。

1 低风压导线的结构特性

在文献[21]中,减小架空线路所受到的风荷载必须减小导线的风阻系数,也就是通过改变导线的外形使其处于超临界状态,这是低风压设计开发的关键。在综合考虑了导线的制造工艺,与塔杆原有的绝缘子金具兼容性以及电晕、无线电干扰和可听噪声等问题后,开发出的低风压导线比常规的钢芯铝绞线或表面光滑导线具有更高的粗糙度,从而使其具有较小的风阻系数。

图 1 为两组市面上已有的低风压导线与对应被替换的常规导线模型,其中低风压 ACSR-410 导线与新型同心绞导线为低风压导线、常规 ACSR-410 导线与圆线同心绞导线为常规导线^[14]。

低风压导线与常规导线相比,外层铝线截面由圆形改为扇形或者梯形,在梯形的四个边角处设有倒圆,外侧两个相邻的小圆弧构成 1 个 V 形沟槽,从而增加了导线的粗糙度^[21]。各导线规格如表 1 所

示,低风压导线结构的改变,增大了外层导线与内层导线的接触面积且使得导线截面面积增加了 5%~10%。

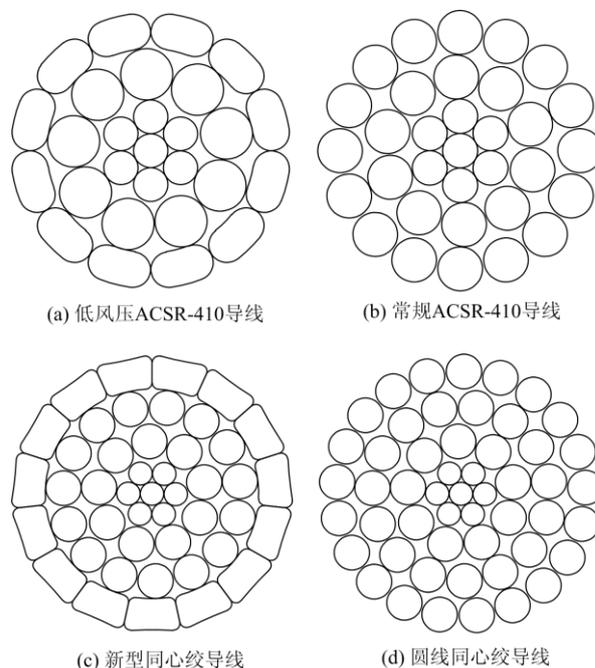


图 1 导线结构简图

Fig. 1 Structure diagram of conductor

表 1 导线规格

Table 1 Conductor specification

名称	数量/直径		钢芯		面积/mm ²	
	铝线		钢芯	铝线	总面积	
	内层	外层				
低风压 ACSR-410 导线	9/5.3	扇形 12/3.7	7/3.5	67.35	450.96	518.31
常规 ACSR-410 导线	26/4.5				413.51	480.86
新型同心绞导线	24/4.22	15/	7/2.81	43.41	682.64	726.05
圆线同心绞导线	45/4.22				629.40	672.81

2 导线稳态热稳定方程

输电线路中当导线的发热功率与散热功率达到平衡时,导线达到热稳定,此时的温度即计算温度。架空导线的温度场计算问题可以简化为具有内热源的对流换热和辐射换热的二维稳态耦合问题^[9,22-23]。导线热稳定方程可用式(1)表示。

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \cdot R_{T_{avg}} \quad (1)$$

式中: q_c 为导线与空气的对流散热量(J); q_r 为导线与外界产生的辐射散热量(J); q_s 为日照生热量(J); I 为导线中通过的电流(A); $R_{T_{avg}}$ 为导线在 T_{avg} 温度下对应的阻值(Ω)。

发热包括电流通过导线产生的焦耳热和日照

生热，散热包括对流和辐射散热，发热量与散热量的大小对于确定导线的温度是非常重要的，下面对影响热稳定的因素进行详细分析。

2.1 生热计算

2.1.1 考虑趋肤效应时的焦耳热

当导体中电流为交变电流时，电流密度在其横截面上沿径向衰减，通过导线的电流等效面积较直流时减小，电阻会高于其直流电阻，从而产生更多的热。在交流电的作用下，电磁波入射到良导体表面，其趋肤深度可表示为^[24-26]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \quad (2)$$

式中： δ 为趋肤深度(m)； ρ 为导体电阻率($\Omega\cdot m$)； ω 为电流角频率(rad/s)； μ_0 为真空中的磁导率， $4\pi\times 10^{-7}$ H/m； μ_r 为导体的相对磁导率。

以低风压 ACSR-410 导线为例对工频 700 A 时的趋肤效应进行仿真，其结果如图 2 和图 3 所示。

对仿真数据进行处理，导线各层电流密度均值

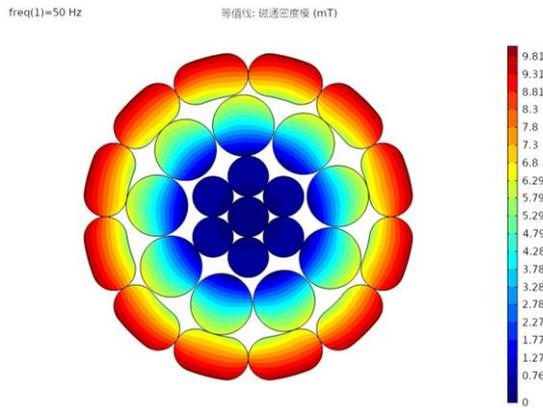


图 2 磁通密度分布

Fig. 2 Magnetic flux density distribution conductor

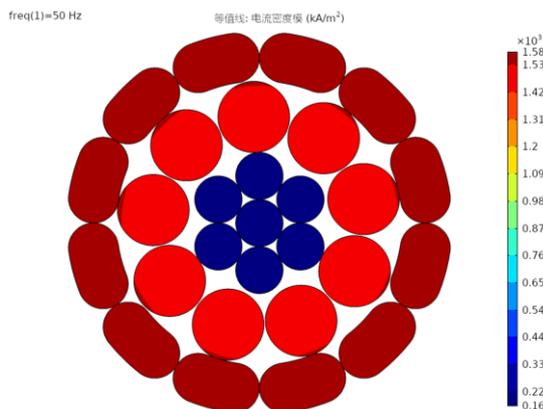


图 3 电流密度分布

Fig. 3 Current density distribution

如表 2 所示。

表 2 导线各层电流密度分布

Table 2 Current density distribution of each layer of conductor

位置	最外层铝层	中间层铝层	内层钢芯
电流密度/(kA/m ²)	1 551.1	1 521.5	162.3
相对比例/%	100	98	11

由图 3 和表 2 可以看出，内外层铝线中电流密度区别并不明显，中间层铝线中的电流密度约为最外层的 98%，这是因为铝导体在工频下的集肤效应深度约达 11.73 cm，远大于导线的截面半径 1.43 cm，所以忽略各层铝线电流密差异以及电流在表面聚集时有效面积减少而引起的交流电阻增大，采用直流电阻代替交流电阻。

则钢芯和铝线的单位体积生热率可表示为

$$\varphi_1 = J_1^2 \rho_1, \varphi_2 = J_2^2 \rho_2 \quad (3)$$

式中： φ_1 、 φ_2 为钢芯和铝线的单位体积生热率(W/m^3)； J_1 、 J_2 为钢芯和铝线的单位电流密度(A/m^2)； ρ_1 、 ρ_2 为钢芯和铝线的电阻率($\Omega\cdot m$)。

2.1.2 铝线的日照生热

由于接受太阳照射部分仅在铝线外表面，因此计算单位体积日照生热率时的体积选取的是最外层铝线的体积，即

$$\varphi_s = \frac{\alpha_s I_s D}{S_2'} \quad (4)$$

式中： φ_s 为单位日照生热率(W/m^3)； α_s 为导线吸热系数^[21]，发黑旧线为 0.90~0.95，光亮新线为 0.23~0.46； I_s 为日照强度(W/m^2)； D 为导线的计算外径(m)； S_2' 为最外层铝线的净面积不包括空气部分(m^2)。

综上，焦耳热存在钢芯和铝线处，日照生热存在导线的外表面，即最外层的铝线处。故把热源分为三部分：钢芯焦耳热、各层铝线焦耳热和铝线日照生热。导线各部分发热率分布如图 4 所示。

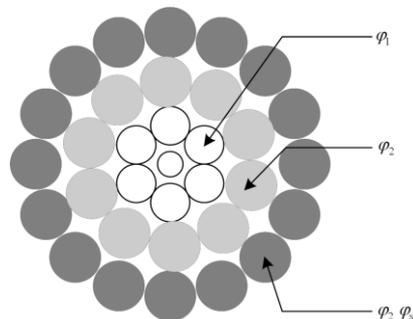


图 4 导线各部分热源分布

Fig. 4 Heat source distribution of each part of conductor

2.2 散热计算

2.2.1 对流散热量

本研究用到的对流传热为无相变传热中的自然对流换热和强制对流两种。将导线作为一无限长水平圆柱暴露在空气中, 在风速小于音速的情况下将空气视为常物性、不可压缩流体。采用 McAdams 推荐的圆柱体对流模型, 自然对流发生在静止空气条件下, 热导体周围的冷空气被加热上升, 并被周围的冷空气取代, 就会发生强制对流。

自然对流时采用文献[27]中壁温或常热流水平长圆柱都适用的公式, 如式(5)所示。

$$q_0 = \frac{k}{D} (T_c - T_0) \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (5)$$

强制对流时风向与导线垂直, 采用在丘吉尔 (Churchill) 与彭斯实验范围内都适用的准则式(6)[28]。

$$q_0 = \frac{k}{D} (T_c - T_0) \left\{ 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2820000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \right\} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: k 为空气导热系数(W/(m K)); D 为导线外径 (m); T_0 为环境温度; T_c 为导线温度, 由求解器每次迭代给出, K; Ra 为瑞利(Rayleigh)数; Pr 为普朗特(Prandtl)数动量扩散能力与热量扩散能力的一种量; Re 为雷诺(Reynolds)数, 惯性力与粘性力之比的一种度量。

2.2.2 辐射散热

当裸露的导体被加热到高于其周围温度时, 能量就通过辐射传递到周围, 辐射散热速率主要取决于导体与其周围环境之间的温差。在环境温度一定的条件下, 导体的表观影响辐射换热辐射由 Stefan-Boltzmann 定律描述, 将辐射能量传输与导体表面温度与周围温度的差, 以绝对温度(Kelvin)的四次方表示。方程中的常数包括 Stefan Boltzmann 常数和转换因子, 以产生所需单位的结果[28]。

$$q_r = 5.73 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F_f \quad (7)$$

式中: ε 为钢芯铝绞线表面辐射系数[16], 视导线新旧取不同值, 一般光亮新线取 0.23~0.46, 发黑旧线取 0.9~0.95; T_c 为导线表面温度; T_0 为环境温度(K); F_f 为单位长度导体的辐射散热面积, 视导线形状和

布置情况而定(m²)。

3 有限元仿真分析

3.1 仿真参数设置

钢和铝两种材料在 20°C 时的电阻率、电阻随温度变化系数以及导热系数按照表 3 进行设定。

表 3 导线参数设置

Table 3 Parameter setting of conductor			
材料	电阻率/(mΩ·m)	电阻温度系数/(1/°C)	导热系数/(W/(m·°C))
铝	28.264	4.03e-3	237
钢	200	3.9e-3	80

以低风压 ACSR-410 导线为例, 环境温度为 20°C, 日照强度为 1 000 W/m², 导线为光新亮线, 吸热系数 α_s 与表面辐射系数 ε 均取 0.4, 导线直径 $D=0.0285$ m。选用焦耳热与固体和流体传热物理场耦合模型, 空气层长宽各 1 m, 初始温度为 20 °C, 左右分别为空气入口和出口, 上下两侧为开放边界、模拟无限大空气场, 右侧为出口。网格采用三角形划分方式, 导线内部及表面处由于传热过程较为复杂, 增加了网格划分密度, 而导线外部传热较为简单, 故网格划分相对稀疏, 网格划分总数为 38 964 个。导线网格划分结果如图 5 所示。

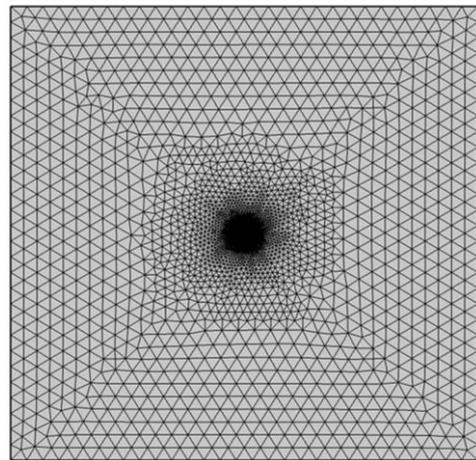


图 5 导线网格划分

Fig. 5 Mesh dividing of conductor

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 自然对流

自然对流时, 电流取 700 A, 低风压 ACSR-410 导线周围空气温度场分布如图 6 所示, 导线附近空气被加热上升, 形成气流。

各导线内部温度分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 四根导线均为下侧温度低, 内部及上部温

度高，且最高温度出现在内部靠上处。这是因为下侧绞线直接与空气接触，将热量传递出去，上侧绞线虽然与空气接触，但由于被上升的热空气包围，故温度高于下侧。内部绞线产生的热量通过不同绞线间的接触以及导线内部密闭的空气形成的气穴传递。由于绞线间的接触面积和导线内的空气热导率很小，内部绞线近似为绝热体，因此对钢芯和内层绞线热的外扩产生了影响，且由于集肤效应的存在，钢芯处产热较少，故最高温度出现在内层铝绞线靠上处。

在环境条件不变的情况下改变载流量，两组导线的温度均值及径向温差随电流变化的曲线如图 8、图 9 所示。

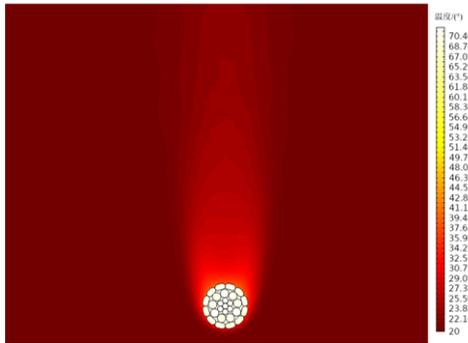
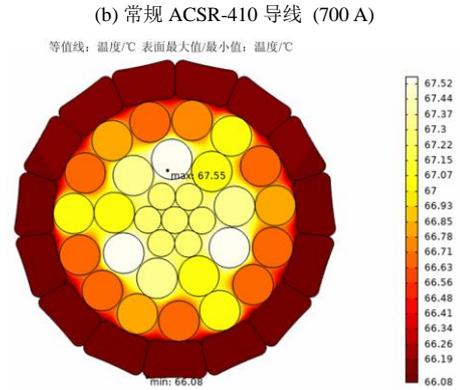
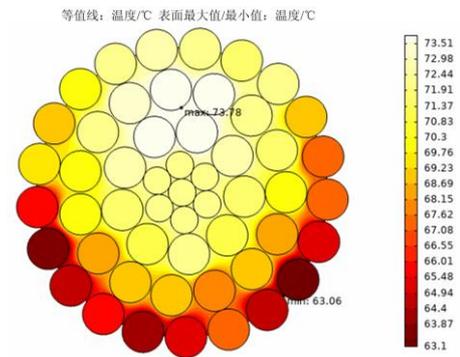


图 6 自然对流下导线周围温度场分布

Fig. 6 Distribution of temperature field around conductor under natural convection



(b) 常规 ACSR-410 导线 (700 A)



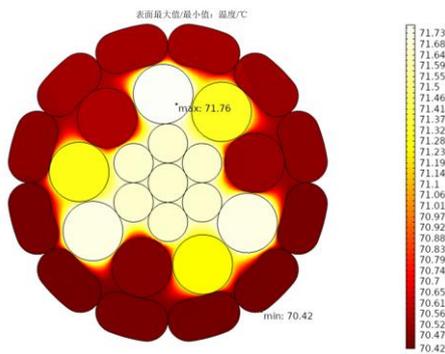
(c) 新型同心绞导线 (900 A)

(d) 圆线同心绞导线 (900 A)

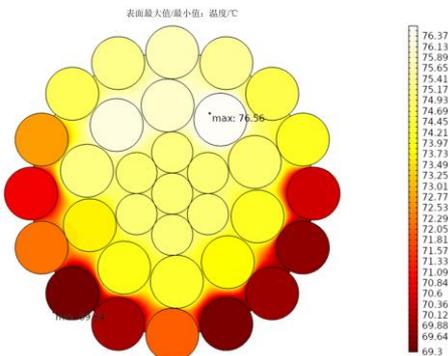
图 7 各导线温度场仿真

Fig. 7 Temperature field simulation of each conductor

结果表明，随着载流量的增加，两组导线温度均值及径向温差均随载流量增加而逐渐增大。值得注意的是低风压导线的温度均值及径向温差始终小于常规导线。由于二者产热率不同，故不能说明低风压导线散热性能要优于常规导线，为了更好地探究两种导线温度分布状况，以 ACSR-410 导线为例，将两种导线设置相同的生热率，且去掉日照生热部分，即排除产热不同对温度的影响。结果如图 10 所示。



(a) 低风压 ACSR-410 导线 (700 A)



(d) 圆线同心绞导线 (900 A)

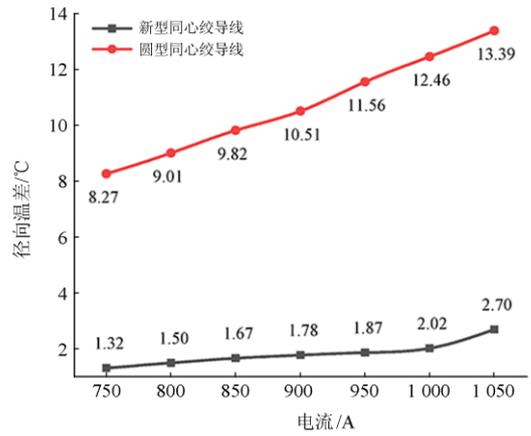
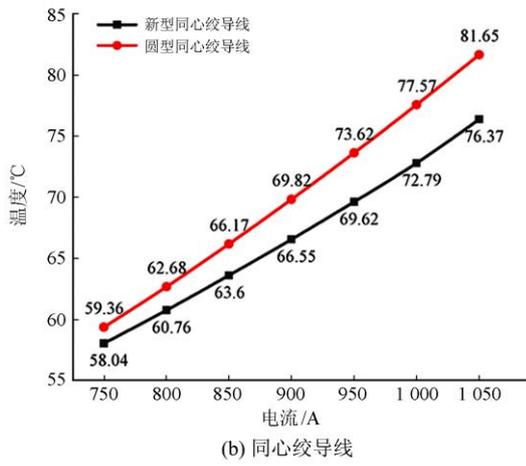
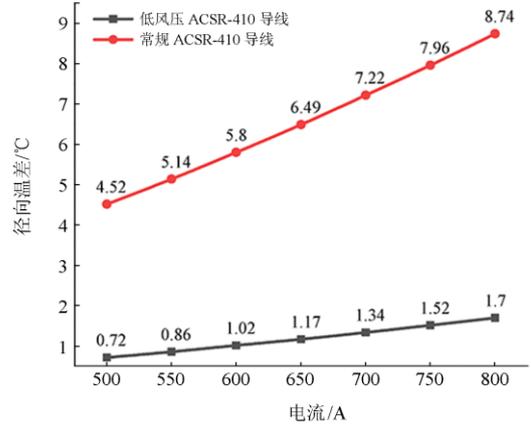
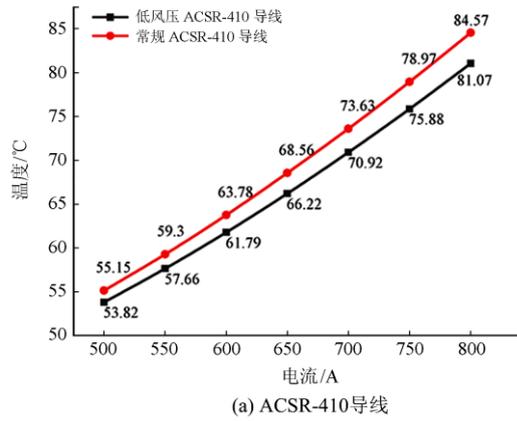
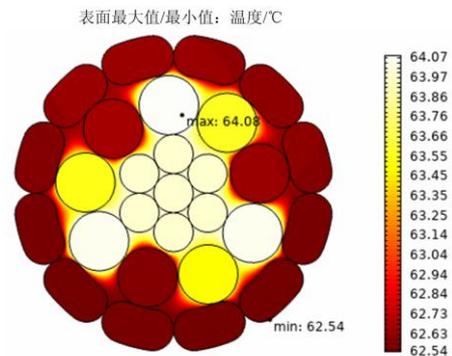


图 8 导线温度与电流关系曲线

Fig. 8 Temperature vs. current relation curve of conductor

图 9 导线径向温差与电流关系曲线

Fig. 9 Relation curve between radial temperature difference of conductor and current



(a) 低风压 ACSR-410 导线

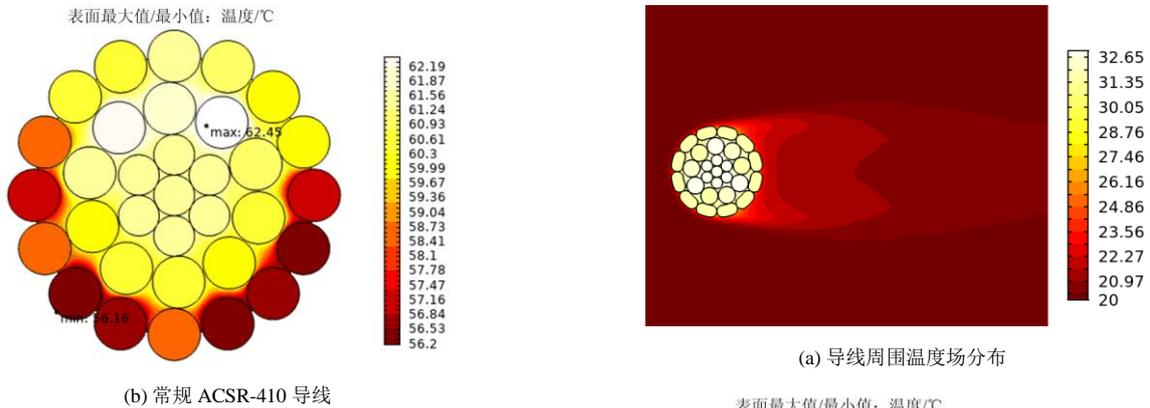


图 10 相同生热率下导线温度场分布

Fig. 10 Distribution of conductor temperature field under the same heat generation rate

由图 10 可知,低风压导线温差仍远小于常规导线,但平均温度比常规导线要高。这是因为低风压导线的构造增大了内部绞线间的接触面积,使得内部气穴更小,从而有利于将热量及时地传递到外层,径向温差小。但低风压导线与空气接触表面积要比常规导线小,对流散热与辐射散热均劣于常规导线。故在相同生热量下低风压导线温度要比常规导线高。在相同载流量下低风压导线温度低于常规导线是低风压导线中铝线截面积增加使导线单位长度的电阻减小、产热量减小造成的。

3.2.2 强制对流

强制对流时,风向与导线垂直,环境温度仍为 20 °C。以低风压 ACSR-410 导线为例,载流量取 700 A,风速 3 m/s 时的仿真结果如图 11 所示。空气在风推动下流经导线表面被导线加热,在尾部形成热气流。由于位于迎风面处的空气温度低,对流换热强度更大,故导线最低温度出现在迎风面处,最高温度位于内侧铝绞线靠近背风面的位置。

各导线温度及径向温差随风速变化的曲线如图 12 和图 13 所示。从图中可以看出,低风压导线与常规导线温度均随风速的增大而下降,且在 0~2 m/s 内下降尤为明显;低风压导线径向温差基本不随风速的变化而变化,常规导线径向温差随着风速的增加逐渐减小,但仍远大于低风压导线。这意味着强制对流更有利于导线的散热,因此导体整体温度会显著降低。且在强制对流时低风压导线仍能保持将内层绞线热量较好地传递至外层的特性。

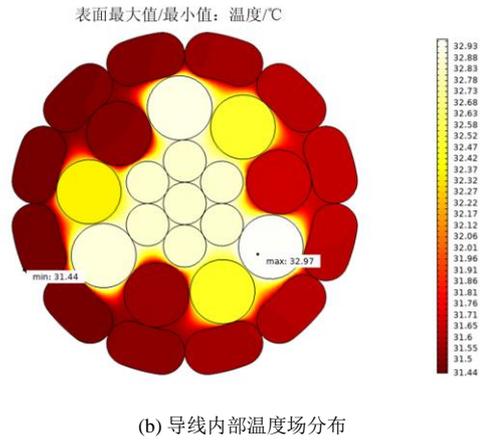
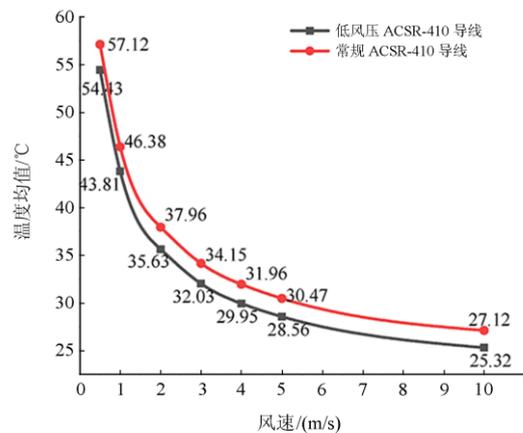
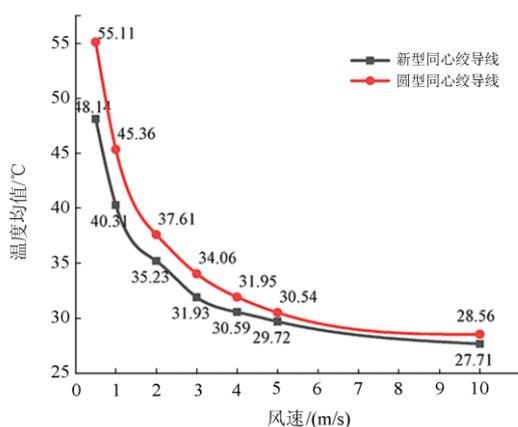


图 11 强制对流下导线温度场分布

Fig. 11 Distribution of conductor temperature field under forced convection



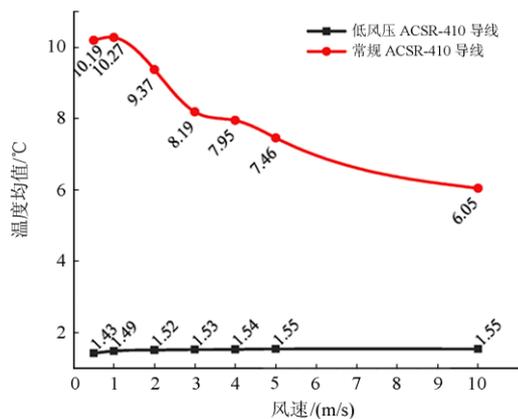
(a) ACSR-410导线温度均值与风速关系曲线(700 A)



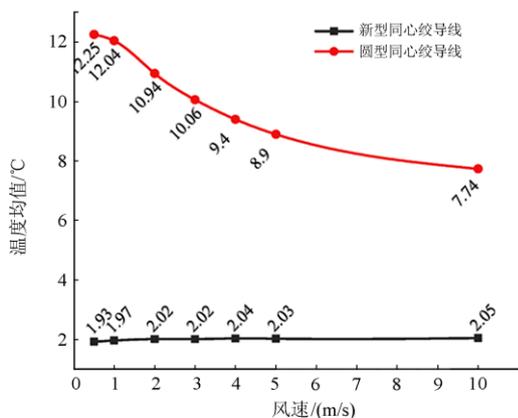
(b) 同心绞导线温度均值与风速关系曲线(900 A)

图 12 导线温度均值与风速关系曲线

Fig. 12 Relation curve between mean conductor temperature and wind speed



(a) ACSR-410 导线



(b) 同心绞导线

图 13 导线径向温差与风速关系曲线

Fig. 13 Relation curve between radial temperature difference of conductor and wind speed

4 结论

在导线稳态热稳定方程的基础上, 对方程中的各个变量的取值加以说明, 建立了基于有限元仿真的多物理场耦合模型, 并对两组低风压导线和常规导线进行对比分析, 得出了以下结论:

1) 低风压导线最外层铝线截面由圆形改为扇形或者梯形后, 不仅起到减小风阻系数作用, 同时还增大了外层导线与内层导线的接触面积, 有利于将热量及时地传递到外层散发出去, 故径向温差比常规导线要小很多, 且径向温差基本不受对流条件的影响。

2) 采用扇形或者梯形结构后, 低风压导线铝截面积增加, 使得导线单位长度的电阻率减小。在相同载流量下单位体积产生的焦耳热也要比常规导线要小很多。虽然扇形或者梯形结构相对于圆绞线结构而言散热效果较差, 但产生的焦耳热少, 故导线整体温度要比常规导线低。使线路具备一定的增容能力。

参考文献

- [1] 段旭东, 韩宇, 陆春阳, 等. 低风压导线与常规导线对比分析[J]. 电气工程学报, 2019(4): 66-71.
DUAN Xudong, HAN Yu, LU Chunyang, et al. Comparative analysis of low wind pressure conductor and conventional conductor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019(4): 66-71.
- [2] 常康, 徐泰山, 郁琛, 等. 自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 73-81.
CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [3] 夏君山, 夏向阳, 赵威, 等. 基于差值电流分析的高压电缆在线监测研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 165-172.
XIA Junshan, XIA Xiangyang, ZHAO Wei, et al. Research on online monitoring for HV cable based on differential current analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 165-172.
- [4] 肖冬萍, 何为, 杨帆, 等. 不同气象条件下特高压输电线路工频电场计算与档距选择[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 35-40.
XIAO Dongping, HE Wei, YANG Fan, et al. Power frequency electric field calculation and span selection of UHV transmission lines under different meteorological conditions[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 35-40.

- 35-40.
- [5] 李清, 马伦, 解健, 等. 大档距多分裂输电导线扭转刚度计算分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 158-162.
LI Qing, MA Lun, XIE Jian, et al. Calculation and analysis on torsional stiffness of large-span multi-conductor bundle[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 158-162.
- [6] 汪应春, 张宇轩, 王赞, 等. 输电线路线损的多参数修正算法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 126-131.
WANG Yingchun, ZHANG Yuxuan, WANG Zan, et al. Multi-parameter correction algorithm for transmission line loss[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 126-131.
- [7] 李晓华, 刘飘, 蔡旺延, 等. 适用于同塔四回输电线路的保护性能评估系统[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 59-66.
LI Xiaohua, LIU Piao, CAI Wangyan, et al. A protection performance evaluation system for four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 59-66.
- [8] 张怡, 张锋, 李有春, 等. 基于智慧输电线路的动态增容辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 160-168.
ZHANG Yi, ZHANG Feng, LI Youchun, et al. Assistant decision system to improve transmission capacity based on a smart transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 160-168.
- [9] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等. 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 86-91.
MA Xiaoming, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Calculation of overhead conductor capacity increase based on thermal stability constraint[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 86-91.
- [10] 彭志勇, 周羽生, 何洋, 等. 对流换热对覆冰导线高频融冰温度分布的影响[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 23-29.
PENG Zhiyong, ZHOU Yusheng, HE Yang, et al. Effect of convective heat transfer on temperature distribution of high-frequency excitation deicing for ice-covered wires[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 23-29.
- [11] 李明明, 王建, 熊小伏, 等. 高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 25-33.
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 25-33.
- [12] WANG M, YANG M, WANG J, et al. Contingency analysis considering the transient thermal behavior of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4982-4993.
- [13] BUCHER M A, ANDERSSON G. Robust corrective control measures in power systems with dynamic line rating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2034-2043.
- [14] 党朋, 吴细毛, 刘斌, 等. 新型同心绞导线风阻力系数风洞试验[J]. 电线电缆, 2014(4): 30-33.
DANG Peng, WU Ximao, LIU Bin, et al. Wind tunnel test of wind resistance coefficient of new concentric twisted conductors[J]. Electric Wire & Cable, 2014(4): 30-33.
- [15] 胡渊尉. 低风压导线的发展和测试[J]. 电线电缆, 2016(5):1-5.
HU Yuanwei. Development and test of low wind pressure conductor[J]. Electric Wire & Cable, 2016(5): 1-5.
- [16] 党朋, 吴细毛, 刘斌, 等. 一种低风压导线: 中国, CN201310467783. X[P]. 2015-04-29.
DANG Peng, WU Ximao, LIU Bin, et al. A new type of low wind pressure conductor: China, CN201310467783. X[P]. 2015-04-29.
- [17] 周泽, 李世霞, 蒋超. 一种复合低风压导线: 中国, CN201420179179. 7[P]. 2014-09-03.
ZHOU Ze, LI Shixia, JIANG Chao. A new type of composite low wind pressure conductor: China, CN201420179179. 7[P]. 2014-09-03.
- [18] 薛济萍, 薛驰, 吴明检, 等. 节能型低风压导线: 中国, CN201220625450.6[P]. 2013-06-05.
XUE Jiping, XUE Chi, WU Mingnian, et al. Energy-saving low wind pressure conductor: China, CN201220625450.6[P]. 2013-06-05.
- [19] MINAMBRES J F, BARANDIARAN J J, ALVAREZ-ISASI R, et al. Radial temperature distribution in ACSR conductors applying finite elements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 472-480.
- [20] HU Jian, XIONG Xiaofu, WANG Jian. Current tolerance capability calculation model of transmission lines and its application in overload protection[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(14): 1509-1521.
- [21] 尤传永. 输电线路低风压导线的开发研究[J]. 电力建设, 2010, 31(12): 1-6.
YOU Chuanyong. Research and development of low wind pressure conductors for transmission lines[J]. Electric

- Power Construction, 2010, 31(12): 1-6.
- [22] 中国电力企业联合会. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Federation of Electric Power Enterprises. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission lines: GB 50545-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [23] IEEE Power Engineering Society. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2013.
- [24] CARDOSO, ROBERTO J, SALLES C, et al. Iterative formulation for the skin effect on cylindrical conductors based on the Feynman's approach[J]. International Journal of Numerical Modelling, 2020, 33(1): 1-11.
- [25] 宋浩永, 王炜, 黄青丹, 等. 载流导体邻近与趋肤效应及电流频率对三相共箱式 GIS 温升的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 97-102.
SONG Haoyong, WANG Wei, HUANG Qingdan, et al. Influence of proximity and skin effect of current carrying conductor and current frequency on the temperature-rise of three-phase-in-one-tank type GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 97-102.
- [26] 兰莉, 仇成, 杜习周, 等. 配电网高温超导电缆的工频参数分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 95-101.
LAN Li, QIU Cheng, DU Xizhou, et al. Power frequency parameter analysis of HTS cables in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 95-101.
- [27] 王晓云. 自然对流状态下横圆管管壁温度圆周方向分布[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1282-1284.
WANG Xiaoyun. Circumferential distribution of wall temperature in horizontal tube under natural convection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(9): 1282-1284.
- [28] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-05-11

作者简介:

魏建华(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为架空线路及电气设备在线监测; E-mail: weijianhuawy@163.com

赵文彬(1977—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为气体放电、电磁兼容和输变电设备状态管理。

E-mail: wenbinmax@163.com

(编辑 姜新丽)