

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.09.024

地埋电缆群解析计算模型的优化及应用

梁永春¹, 王翔宇¹, 傅晨钊²

(1. 河北科技大学, 石家庄 050054; 2. 上海电力科学院, 上海 200437)

摘要: 土壤外部热阻是埋地电缆载流量的重要影响因素之一,其计算模型的准确性对电缆温度场和载流量的准确评估具有重要意义。由于土壤外部热阻主要受电缆外径、埋深和发热量的影响,首先采用Ansys软件和IEC-60287标准计算公式相结合,求取了不同变量值下外部热阻的大量样本数据,然后利用多变量线性回归分析的方法对样本数据进行拟合,得到了综合电缆外径、埋深和发热量等因素的地埋电缆外部土壤热阻的计算模型。为了验证计算模型的准确性,分别以单回路、双回路、三回路XLPE电缆群为例,利用计算模型计算了不同工况下的缆芯温度,并与Ansys计算结果和IEC-60287计算结果进行了对比,比较结果表明所得到的计算模型比IEC-60287更接近于有限元仿真结果,便于在保证准确性的前提下实现工程应用。

关键词: 电缆; 有限元; 回归分析; 外部热阻; 温升

Optimization and Application of Analytical Calculation Model of Underground Cable Group

LIANG Yongchun¹, WANG Xiangyu¹, FU Chenzhao²

(1. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China; 2. Shanghai Electric Power Academy, Shanghai 200437, China)

Abstract: The external thermal resistance of soil is one of the important factors influencing the load flow of buried cable. The accuracy of the calculation model is of great significance for the accurate evaluation of cable temperature field and load flow. Firstly using the Ansys software and combining the calculation formula of IEC-60287 standard, the external thermal resistance of soil is mainly influenced by the cable diameter, the buried depth and the calorific value, which is under different variable values to calculate the external thermal resistance of a large number of sample data, and then the method of using a multivariate linear regression analysis was carried out on the sample data fitting, the comprehensive factors such as cable diameter, buried depth and calorific value of buried cable outside the calculation model of soil thermal resistance. In order to verify the accuracy of the calculation model, which is used to calculate the core temperature under different working conditions, respectively by single loop described, properties, double circuit, three loop cable group as an example, and with the Ansys calculated results and the IEC-60287 compares the calculation results, the comparison results show that the calculation model of IEC-60287 is closer to the finite element simulation results, ensuring the premise of guarantee the accuracy of the engineering application.

Key words: cable; finite element; analysis of regression; external thermal resistance; temperature rise

0 引言

载流量是高压电力电缆线路运行的基本参数之一,其准确计算对于保障电力电缆线路的安全运行具有重要的意义。对于地埋电缆,外部土壤的导

热性能是影响载流量的主要因素之一。在解析计算中,外部土壤往往以一个外部土壤热阻 T_4 的形式表示。地埋电缆的敷设方式、排列方式、埋深、土壤的导热系数、电缆周围回填介质的热特性等等,都会直接影响电缆外部土壤热阻的大小。因此,外部

土壤热阻的计算一直以来都是载流量准确计算的难点。在电缆线路越来越密集、负荷越来越高的现实条件下,找到外部热阻准确计算模型对于提高缆芯温度和载流量的预测精度具有重要意义^[1]。

通常解析法计算载流量的方法中,大多采用 IEC-60287 标准^[2-4]。IEC 计算标准是按照 Kennelly 假设^[5-13],即直埋电缆的热场符合以下条件:①大地表面为等温面;②电缆表面为等温面;③叠加原理适用。但实际敷设环境中地表并非等温面、电力电缆表面也不是等温面^[14-15],因此利用 IEC-60287 计算的土壤外部热阻大于实际热阻,造成温度场计算结果偏于保守。

文中利用 Ansys 有限元仿真软件结合热路模型探究了外部热阻的影响因素,并计算得到一系列 T_4 的样本数据;通过回归分析的方法拟合得到土壤外部热阻的计算模型;最后利用优化后的解析计算模型对实际电缆线路温度场计算,验证了该模型的有效性。

1 热阻计算理论

1.1 样本数据计算

电缆发热特性可利用热路或热流场的概念进行分析,热路和热流场与电路和电流场中的物理量有对应关系,因此可以利用电流场和电路知识来分析电缆热特性。电缆等效热路模型^[16]见图 1。

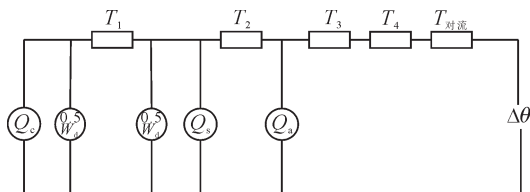


图 1 电力电缆等效热路模型

Fig. 1 Thermal circuit model of cable

图 1 中: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 $T_{\text{对流}}$ 分别为绝缘层热阻、内衬层热阻、外护层的热阻、土壤层总的外部热阻和地表与空气对流热阻; Q_c 、 W_d 、 Q_s 、 Q_a 分别为缆芯导体、绝缘介质、金属护套和铠装层的损耗。对于单芯 XLPE 电缆,其结构不包含铠装层,故 $Q_a=0$ 。 $\Delta\theta$ 为高于环境温度的导体温升,类比电路中求解节点电压的方法可知^[17-22]

$$\Delta\theta = T_1 \times (Q_c + 0.5W_d) + (Q_c + Q_s + W_d) \times (T_2 + T_3 + T_4 + T_{\text{对流}}) \quad (1)$$

其中外部热阻计算公式为

$$T_4 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2)$$

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: ρ_r 为土壤的热阻系数, $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$; L 为电缆轴线到地面的距离, mm ; D_e 为电缆外径, mm 。

由缆芯温升计算公式可以看出外部土壤热阻 T_4 是其中的重要一项,而且土壤面积较大,与其他电缆本体热阻相比,其数值必然较大, T_4 的准确计算将直接影响到缆芯温升和载流量的计算精度。根据式(2)、(3)可以得知,外部热阻受电缆外径、电缆埋深、土壤导热系数等影响,因此需要对各种影响 T_4 的因素进行研究。

由于电缆为圆形多层结构,而外部土壤热阻描述的是电缆外护层以外的土壤的散热特性,因此可以采用一个圆形发热棒模型代替圆形电缆模型,二者均通过圆周面的形式向四周散热,而且散发同等热量时,对电缆外部热阻的影响是等效的。发热棒的外径代替电缆外径、发热棒埋深代替电缆埋深,同时在土壤外部热阻模拟时还省略了内部各层热阻的计算,简化了仿真研究的过程。

电缆线路较长,除特设路段外,电缆纵深方向的温度场是一样的,单位长度的电缆发热只通过径向方向向土壤散热,因而可以看成是一个二维场进行分析。由于土壤深处的温度值不随电力电缆发热而变化,既默认为一个恒定值^[23],故文中不作考虑,因此选择金属棒下方 10 m 作为求解域的第 1 类边界条件;由于左右两边远离金属棒方向的土壤相关参数也不会随其发热而产生变化,因此选择左右两边 20 m 作为求解域的第 2 类边界条件,即法向温度梯度为 0;地表为第 3 类边界条件,通过对流换热和辐射换热向空气中散热。仿真研究模型见图 2,敷设条件见表 1。

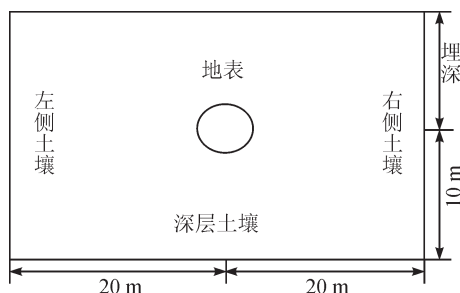


图 2 发热棒敷设模型

Fig. 2 The model of buried heating metal stick

由于发热棒为金属,属于良导热体,可以忽略其热阻,其热量通过土壤及地表对流换热进行扩散,其外部热阻计算公式可表示为

$$T_4 = \frac{\theta_c - \theta_{\text{air}}}{Q_c} - T_{\text{对流}} \quad (4)$$

表1 发热棒敷设条件

Table 1 Heating metal stick's laying conditions

敷设条件	参数值
土壤热阻/[K·(m·W) ⁻¹]	1.2
地层深层温度/℃	8.0
空气温度/℃	40.0
空气对流换热系数/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	12.5

式(4)中: θ_c 为缆芯温度; θ_{air} 环境温度。分析可知,土壤外部热阻主要与发热管外径、埋深和发热量有关,研究中,首先利用 Ansys 获得这3种因素不断变化下的温度场,同时获得发热管的温度,利用式(4)可计算得到一系列外部热阻 T_4 样本数据。以半径 0.042 m,埋深 1 m,缆芯发热 30 W/m 的发热棒为例,由 Ansys 模拟得到其温度场分布见图3。部分样本见表2-4。

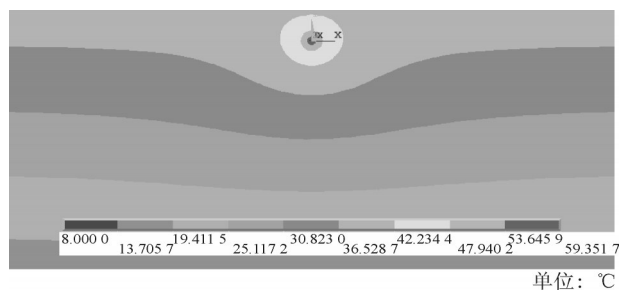


图3 发热棒温度场分布

Fig. 3 The temperature diagram of heating metal stick

表2 不同半径的样本数据

Table 2 Data of different radius

半径/m	埋深/m	发热量/(W·m ⁻¹)	外部热阻/(K·W ⁻¹)
0.03	0.9	25	0.600 8
0.04	0.9	25	0.546 0
0.05	0.9	25	0.503 2
0.06	0.9	25	0.468 4

表3 不同埋深的样本数据

Table 3 Data of different burial depth the sample data of heating metal stick

半径/m	埋深/m	发热量/(W·m ⁻¹)	外部热阻/(K·W ⁻¹)
0.04	0.5	25	0.488 8
0.04	0.7	25	0.523 6
0.04	0.9	25	0.546 0
0.04	1.1	25	0.560 0
0.04	1.3	25	0.569 2
0.04	1.5	25	0.574 4
0.04	1.7	25	0.577 2

为确定回归分析所采用的计算模型,需要对样本数据中的变量与因变量的函数关系进行初步分析,由表2-4分别绘制外部热阻 T_4 与发热管半径、埋深、发热量的函数关系图,见图4。

表4 不同发热量的样本数据

Tab. 4 Data of different heat the sample data of heating metal stick

半径/m	埋深/m	发热量/(W·m ⁻¹)	外部热阻/(K·W ⁻¹)
0.03	0.7	10	0.442 0
0.03	0.7	15	0.518 0
0.03	0.7	20	0.556 0
0.03	0.7	25	0.578 8
0.03	0.7	30	0.594 0
0.03	0.7	35	0.604 9
0.03	0.7	40	0.613 0

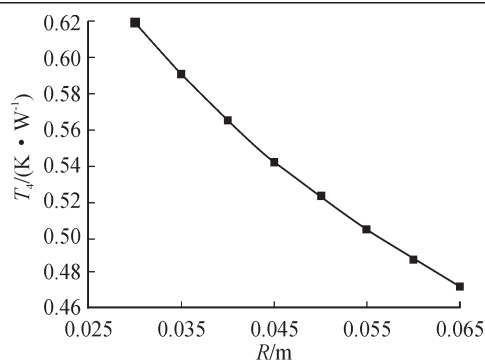
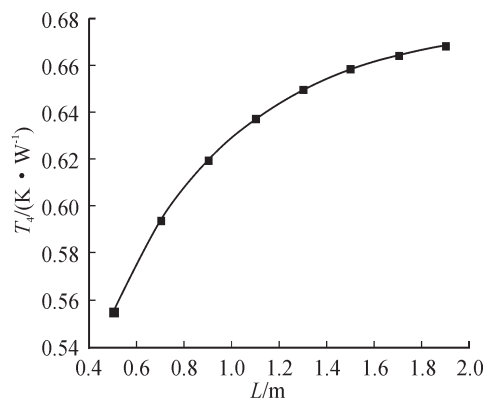
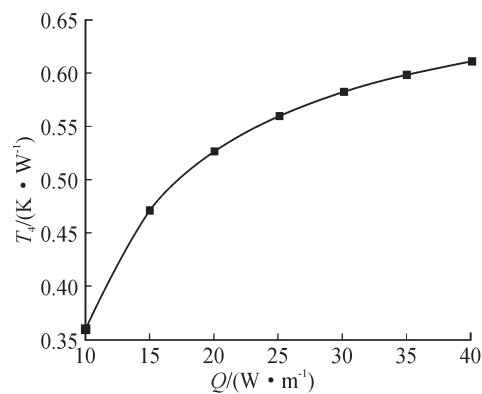
(a) R 与 T_4 关系(b) L 与 T_4 关系(c) Q 与 T_4 关系

图4 三变量与外部热阻的关系

Fig. 4 The relationship between T_4 and R, L and Q

由图4外部热阻 T_4 与各变量的关系图发现, T_4 与电缆埋深和发热量均成非线性关系,因此通过非

线性回归的方式来解决此问题。

1.2 回归分析

回归分析法指利用数据统计原理,对大量统计数据进行处理,并确定因变量与某些自变量的相关关系,建立一个相关性较好的回归方程(函数表达式),并加以外推,用于预测今后的因变量的变化的分析方法。根据因变量和自变量的个数分为:一元回归分析和多元回归分析;根据因变量和自变量的函数表达式分为:线性回归分析和非线性回归分析^[24-25]。由于任一连续函数都可以用多项式来逼近,所以文中通过三元二次多项式回归的方法建立外部热阻 T_4 的回归模型。

回归模型如下

$$T_4 = \beta_0 + \beta_1 \cdot R + \beta_2 \cdot L + \beta_3 \cdot Q + \beta_{11} \cdot R^2 + \beta_{22} \cdot L^2 + \beta_{33} \cdot Q^2 + \beta_{12} \cdot R \cdot L + \beta_{13} \cdot R \cdot Q + \beta_{23} \cdot L \cdot Q \quad (5)$$

经多次检验发热管半径 R 与埋深 L 和发热量 Q 的交互作用并不明显,故决定采用简化的回归模型

$$T_4 = \beta_0 + \beta_1 \cdot R + \beta_2 \cdot L + \beta_3 \cdot Q + \beta_{11} \cdot R^2 + \beta_{22} \cdot L^2 + \beta_{33} \cdot Q^2 + \beta_{23} \cdot L \cdot Q \quad (6)$$

利用origin自定义函数拟合该模型,输出结果显示:校正的相关系数 $R^2=0.975\ 32$, $F=26\ 494.135\ 43$, $\text{Prob}>F$ 的值为0。其中 R^2 统计量的值表示模型的拟合优度,其值越接近1说明拟合效果越好; F 统计量的值表示回归方程的显著性检验, $\text{Prob}>F$ 的数值小于0.05就认为差异显著,小于0.01差异极其显著。将求解得到的系数代入式(6)得最终的回归方程为

$$T_4 = 0.466 - 9.14R + 0.037L + 0.019Q + 52.47R^2 - 0.061L^2 - 0.000\ 365Q^2 + 0.005\ 8L \cdot Q \quad (7)$$

2 实验验证与结果分析

2.1 单回路实例验证

由于有限元法能够准确模拟电力电缆复杂的敷设环境,由此计算得到的电缆温度场与实际情况最为接近^[26],故以下验证均以有限元计算结果为参照。

以土壤直埋单回路110 kV 800 mm²YJLW02 XPLE电缆群为例,电缆每相间距0.2 m,单位长度介质损耗为0.907 W/m,计算了电缆在等负荷不等埋深,等埋深不等负荷,等负荷等埋深不同环境温度情况下缆芯温度。敷设环境条件见表1,电缆结构参数见表5。由于热效应具有叠加性,因此,计算每一根电缆温度值时,可以把其它电缆的影响以环境温度的升高来考虑。首先利用优化后的解析计算模型计算第 P 根缆芯温度再加上其余电缆对第 P 根的温升即为第 P 根电缆缆芯的实际温度。每一根电

缆对另一根电缆环境温度的影响可以根据镜像法进行计算^[11],镜像法示意图见图5。

表5 电缆结构参数

Table 5 Structural parameters of the cable

结构名称	参数值/mm
导体直径	34
绝缘层厚度	20
金属屏蔽层厚度	2
外护层厚度	3
电力电缆直径	84

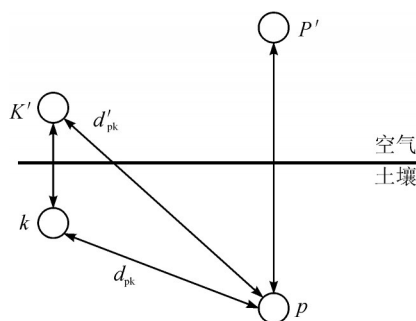


图5 镜像法示意图

Fig. 5 The schematic of method of images

第 k 根电缆单位长度的散热量对第 p 根电缆所引起的环境温度升高为

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{\rho_T}{2\pi} Q \ln\left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}}\right) \quad (8)$$

ρ_T 为土壤热阻系数, Q 为电缆导体总发热量。

电缆导体在等负荷不等埋深,等埋深不等负荷,等负荷等埋深不同环境温度情况下中间相电缆的缆芯温度分布图分别见图6-8。由计算结果可以看到,优化后的计算结果与有限元基本保持一致,明显优于IEC计算结果。由此验证了土壤外部热阻计算模型在不同敷设变量,不同环境温度下的有效性。

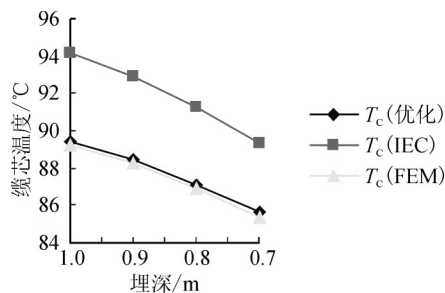


图6 不同埋深计算结果

Fig. 6 The calculation result of different burial depth

2.2 多回路实例验证

以双回路110 kV 800 mm²YJLW02 XPLE电缆群为例,每相间距0.2 m,导体通以800 A电流,计算得到每相导体损耗分别为:14.86、14.66、14.5、14.51、14.65、14.87 W/m;金属护套损耗分别为:

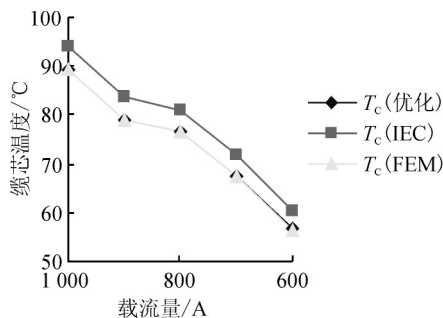


图7 不同负荷计算结果

Fig. 7 The calculation result of different load

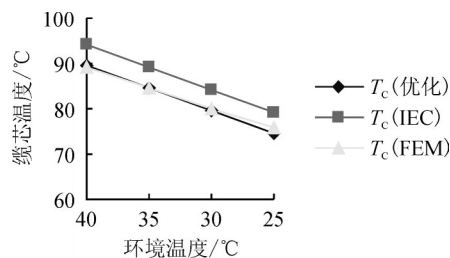


图8 不同环境温度计算结果

Fig. 8 The calculation result of different environment temperature

2.32、1.08、0.071、0.078、1.03、2.39 W/m;单位长度介质损耗为0.907 W/m。利用拟合得到的外部热阻 T_4 模型式(4)结合IEC温度场计算公式与镜像法计算埋深1 m时的缆芯温度,并与传统的IEC-60287解析算法、FEM有限元法进行比较。敷设环境条件见表1,计算结果见表6。优化后的计算结果与有限元计算的结果最大偏差0.5 °C。

表6 双回路电缆计算结果

Table 6 The calculation result of double loop cable °C

相别	T_c (优化)	T_c (IEC)	T_c (FEM)
A ₁	79.72	84.32	80.15
B ₁	83.63	88.16	84.00
C ₁	84.88	89.33	85.26
A ₂	84.89	89.34	85.23
B ₂	83.61	88.13	83.87
C ₂	79.77	84.37	79.53

以三回路110 kV 800 mm²YJLW02 XPLE电缆群为例,每相间距0.2 m,导体通以700 A电流,计算得到每相导体损耗分别为:12.45、12.26、12.21、12.17、12.16、12.16、12.22、12.3、12.48 W/m;金属护套损耗分别为:2.27、0.841、0.505、0.23、0.128、0.158、0.54、1.15、2.48 W/m;单位长度介质损耗为0.907 W/m。利用拟合得到的外部热阻 T_4 模型式(4)结合IEC温度场计算公式与镜像法计算埋深1 m时的缆芯温度,并与传统的IEC-60287解析算法、FEM有限元法进行比较。敷设环境条件见表1,计算结果见表7。由计算结果表明,优化后的计算结

果与有限元计算结果最大偏差值在2 °C以内,而IEC计算结果中,最高偏差高达5 °C。

表7 三回路电缆计算结果

Table 7 The calculation result of three-loop cable °C

相别	T_c (优化)	T_c (IEC)	T_c (FEM)
A ₁	77.64	82.10	78.55
B ₁	81.74	86.05	82.62
C ₁	84.30	88.57	85.00
A ₂	85.31	89.54	86.59
B ₂	85.67	89.89	87.37
C ₂	85.34	89.56	86.59
A ₃	84.24	88.52	84.65
B ₃	82.07	86.41	81.59
C ₃	77.94	82.42	76.89

综上,优化后的土壤外部热阻计算模型与在多回路敷设情况下同样具有较高的准确性。

3 结论

1)经研究分析发现:土壤外部热阻 T_4 随着电缆外径的增大,以近似线性的趋势减小;随着埋深和缆芯发热量的增大呈指数函数的形式增加。

2)实例计算结果表明:将优化后的土壤外热阻计算模型替代原解析模型的土壤外部热阻计算公式,计算结果与有限元基本一致,优于IEC-60287的计算结果。提高了解析法计算缆芯温度场模型的计算精度,对直埋电缆群温度场的快速、准确计算具有重要意义。

3)改变空气温度时,优化后的解析计算模型计算结果与有限元计算结果仍吻合,证实了该模型的普适性、可行性。

参考文献:

- [1] 张 鸣,樊友兵,刘松华,等.采用低热阻系数回填材料提升穿管敷设电缆载流量[J]. 高电压技术,2016,42(8): 2394-2398.
ZHANG Ming, FAN Youbing, LIU Songhua, et al. Mprovement in power cables ampacity in ducts by using low thermal resistivity backfill material[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2394-2398.
- [2] Calculation of the current rating-Part 1: Current rating equations(100% load factor) and calculation of losses; IEC 60287-1:2001[S]. 2001.
- [3] Calculation of the current rating-Part 2: Thermal resistance; IEC 60287-2:2001[S]. 2001.
- [4] Calculation of the current rating-Part 3: Sections on Operating Conditions; IEC 60287-3: 1999[S]. 1999.

- [5] 梁永春, 赵 静, 闫彩红. 沟槽电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3048-3053.
LIANG Yongchun, ZHAO Jing, YAN Caihong. Numerical calculation of temperature field and ampacity of power cables in channel[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3048-3053.
- [6] 王世山, 王德林, 李彦明. 大型有限元软件 Ansys 在电磁领域的使用[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 27-30.
WANG Shishan, WANG Delin, LI Yanming. Using software Ansys to analyze electromagnetic process[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 27-30.
- [7] 傅晨钊, 司文荣, 祝令瑜, 等. 基于转移矩阵的土壤直埋电缆群稳态温升快速算法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 0134-0139.
FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Fast calculation method for steady temperature rise of buried cable group based on transfer matrix[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 0134-0139.
- [8] 梁永春, 柴进爱, 李彦明, 等. 基于 FEM 的直埋电缆载流量与外部环境关系的计算[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(4): 11-13.
LIANG Yongchun, CHAI Jin'ai, LI Yanming, et al. Calculation of ampacity reduction factors for buried cables with surroundings based on FEM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(4): 11-13.
- [9] 程树康, 李伟力, 侯云鹏. 基于耦合边界条件的发电机定子非线性温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 1-6.
CHENG Shukang, LI Weili, HOU Yunpeng. Calculation of nonlinear stator temperature field for generator based on hybrid boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 1-6.
- [10] 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.
DUAN Jiabing, YIN Chengqun, LYU Anqiang, et al. Analysis method for high voltage submarine cable based on IEC 60287 and finite method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 1-6.
- [11] 梁永春, 孟凡凤, 王正刚, 等. 土壤直埋电缆群额定载流量的计算[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 244-246.
LIANG Yongchun, MENG Fanfeng, WANG Zhenggang, et al. Ampacity calculation for groups of buried cable[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 244-246.
- [12] NEHER J H, MCGRATH M H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems[C]// AIEE Summer General Meeting. Montreal, Canada, [s.n.]: 1957: 752-772.
- [13] 刘畅, 徐 政, 宣耀伟, 等. 基于等效导热系数的直流电缆稳态载流量简化有限元算法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 7-13.
LIU Chang, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Simplified finite element method for calculating DC cable's capacity using equivalent thermal conductivity[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 7-13.
- [14] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1142-1150.
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.
- [15] 张洪麟. 基于有限元法的地下电缆温度场和载流量的计算及仿真[J]. 重庆: 重庆大学, 2009.
ZHANG Honglin. Computation and simulation of temperature field and ampacity for underground cable based on finite element method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [16] 张洪麟, 唐 军, 陈伟根, 等. 基于有限元法的地下电缆群温度场及载流量的仿真计算[J]. 高压电器, 2010, 46(2): 42-45.
ZHANG Honglin, TANG Jun, CHEN Weigen, et al. Simulation of temperature field and ampacity of underground cable system based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 42-45.
- [17] 刘同同. 基于热路模型的电力电缆导体温度计算及试验研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
LIU Tongtong. Computational and experimental research on conductor temperature of power cable based on thermal circuit model[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016.
- [18] 罗灵琳. 单芯电缆温度场及载流量实时计算方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
LUO Linglin. Study on the transient-state temperature field and ampacity real-time calculation method of single-core cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [19] 郑雁翎. 电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3760-3765.
ZHENG Yanling. Research on optimal numerical calculation model of cable groups ampacity in cable route[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3760-3765.
- [20] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
MA Guodong. Ampacity of cable[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [21] 李超群, 沈培锋, 马宏忠, 等. 多回路土壤直埋高压电缆温度场建模与载流量计算[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 63-69.
LI Chaoqun, SHEN Peifeng, MA Hongzhong, et al. Modeling of soil buried multi-circuit cables' temperature field and ampacity calculation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 63-69.