

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.019

埋地电缆群实时动态载流能力快速评估方法

司文荣^{1,2}, 梁永春³, 赵莹莹^{1,2}, 傅晨钊^{1,2}

(1. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122;
3. 河北科技大学电气工程学院, 石家庄 050018)

摘要: 准确、快速计算应急负荷和转供负荷工况下埋地电力电缆群暂态缆芯温升对于提高电力电缆动态载流能力精细化管理水平具有重要的意义。首先利用有限元稳态分析获得转移矩阵,利用有限元暂态分析获得单根加热电缆下的自热暂态温升数据和其余电缆的互热暂态温升数据;然后构建了复合暂态热路模型,加载电缆的自热热路模型由二支路热阻—热容组成,邻近电缆的互热热路模型由一支路热阻—热容组成,给出了复合暂态热路模型的龙格库塔法求解方法;最后以有限元计算结果为基准,利用遗传算法优化求解复合热路模型的热阻和热容参数。针对具体实例,利用转移矩阵获得各电缆稳态温升,通过每一个时间步修正损耗实现热电耦合,利用复合热路模型计算任意一根电缆的动态载流量。与有限元计算结果对比表明,该方法具有较高的精度,可以用于工程中直埋电缆群的应急负荷和转供负荷电流运维管理。

关键词: 埋地电缆群;复合暂态热路模型;暂态缆芯温升;动态载流量;龙格库塔法;转移矩阵;热电耦合

Fast Assessment Method for Real-time Dynamic Current-carrying Capacity of Buried Power Cables

SI Wenrong^{1,2}, LIANG Yongchun³, ZHAO Yingying^{1,2}, FU Chenzhao^{1,2}

(1. East China Electric Power Test & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200437, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. School of Electrical Engineering, Hebei University Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Accurately and rapidly calculating the transient core temperature rise in buried power cables under emergency load and transferred load conditions is of great significance for improving the refined management level of dynamic current-carrying capacity of power cable. First, a transfer matrix is obtained by using the finite element steady-state analysis, while finite element transient analysis is used to obtain self-heating transient temperature rise data for a single cable and mutual-heating transient temperature rise data for the rest cables. Then, a composite transient thermal circuit model is constructed. The self-heating thermal model of the loaded cable consists of two-branch of thermal resistance-thermal capacitance network, while the mutual-heating thermal circuit model of adjacent cables comprises a single-branch of thermal resistance-thermal capacitance network, and a Runge-Kutta method is presented to solve this composite transient thermal circuit model. Finally, the finite element simulation results are taken as a benchmark, a genetic algorithm is applied to optimize and solve for the thermal resistance and thermal capacitance parameters of the composite thermal circuit model. For a specific case study, the transfer matrix is used to obtain the steady-state temperature rise of each cable. Thermal-electrical coupling is achieved by updating losses at each time step, and the composite thermal circuit model is then employed to calculate the dynamic current carrying capacity of any individual cable. It is shown by the comparison with the finite element calculation results that the proposed method in this paper has high accuracy and is suitable for engineering applications involving operational management of emergency and load-transfer currents in directly buried cables.

Key words: buried power cables; composite transient thermal circuit; transient core temperature rise; dynamic current-carrying capacity; Runge-Kutta method; transfer matrix; electrical-thermal coupling

收稿日期:2025-07-11; 修回日期:2025-10-30

基金项目:上海市青年科技启明星项目(23QB1400600)。

Project Supported by Shanghai Rising-star Program for Young Scientists and Technologists(23QB1400600).

0 引言

在新型电力系统建设中,电缆线路的载流能力研究主要体现在两个方面:现有地下电缆的供电网络往往呈现环形结构,便于在某条线路出现故障时进行网络重构,由邻近的线路承担故障线路用户的应急供电;在不新增线路的条件下根据发电和用电潮流分析进行网络重构,承担起新能源发电的接入,因此电力电缆线路的动态增容成为当前研究的热点^[1-3]。作为主要输配电电缆敷设方式,地下电缆的散热途径包含了一个大面积的土壤区域,不满足集总参数表征的条件,且受发热、暴晒、降雨等因素存在热湿迁移和地表的对流换湿,使得土壤区域的热表征变得更加困难^[4-6],给准确评估当前环境和负荷条件下的电缆缆芯温度带来了困难,无法满足现代电力系统可靠供电的需求。因此,利用高效、准确的方法快速评估现有电力电缆线路在增容负荷下的热状态,从而判断是否满足应急负荷、新能源接入等工程需求,同时还能够保证可靠性和安全性,成为电力公司重点关注的电缆运维管理问题。

交联聚乙烯电力电缆规定,可依据绝缘层耐受温度不超过250℃计算5s可承载的短路电流;依据绝缘层耐受温度不超过130℃,计算100h短时过载电流,且整个寿命期间不超过5次^[7-8]。如果短路时间更长或过载次数较多时,为了保证电力电缆的可靠性、安全性和使用寿命,需仍然按长期绝缘耐受温度90℃计算动态载流量。这些规定是在动态增容工况下开展地理电缆缆芯温度快速评估的依据。

无论是应急负荷还是新能源接入,均为暂态负荷,可以根据IEC 60853:2014和国内对应的JB/T 10181.2—2000标准计算其缆芯温度^[9-12]。对于长时间的周期性负荷,需要保证在长期工作时间内交联聚乙烯绝缘层的最高温度不超过90℃。标准给出了周期负荷曲线的表征关系式,由周期性负荷因子和由标准计算得到的额定载流量共同确定周期性负荷载流量。对于暂态负荷下的缆芯温升计算,标准将地理电缆群分解为电缆本体、环境土壤和邻近电缆3个部分,分别由二支路的等效热路模型和镜像法计算其温升,三者相加得到缆芯的温升,国内外广大电力公司大多依据标准给定方法进行负荷调度。但实际运行过程中存在不断变化的工况,标准需要不断更新和修订。

随着Ansys/Comsol等研究工具的推广,广大研究人员已经利用有限元等数值计算方法针对电缆运维部门关注的焦点线路等进行了研究,给出了载

流量指导建议^[13-15]。有限元法可以适用于任意复杂的工况,还可以实现多种物理场的耦合分析,具有较高的计算精度,但利用有限元进行电缆线路热特性分析要求研究人员要熟悉多场理论,限于其编程和操作的复杂性,不适于现场工程师的实际应用,往往应用于典型复杂线路的研究。此外,应急负荷有时效性要求,从建模到仿真,有限元分析均需要较长的时间,显然难以满足动态增容快速评估的工程需求。

近年来,电力公司在电缆线路安装了大量的光纤测温装置,或者在新线路中直接购买内嵌光纤的电缆。光纤监测可以实现实时的温度监测,并可由测得温度值根据负荷电流损耗和缆芯至光纤安装处的热阻逆向推算出缆芯的温度,从而实时把握电缆的热状态,判断出电缆是否有增容的可能和定性判断增容空间,如果接近90℃,即使有少量的增容空间,也不建议对该线路进行增容^[16-18]。但如果与90℃还有较大的距离,则可进行增容,但光纤测温数据无法直接给出可增容的容量。况且,现有大量的电缆线路已经运行20~30年以上,很多线路并没有安装测温光纤,没有判断是否可增容的依据。

此外,电力部门和研究单位还开展了大量的真型试验研究,获得了大量的第一手数据。但试验研究往往难以反映复杂多变的现场,还不能作为动态增容的绝对依据^[19-21]。

应急负荷属于短时工况,为了提高供电可靠性,对电缆增容能力判断的快速性、操作便捷性和准确性均有较高的要求,为此多名研究人员提出了多种热路模型^[22-24]。王鹏宇等对电缆本体进行了研究,特别是如何用热路模型表征三芯电缆,给出了解决方案^[25]。DIAZ A M和J. LUX等提出了多个热阻—热容支路模型来表征不能满足集总参数模型的大面积土壤介质,但支路数较多,给工程应用的操作便捷性带来了一定的困难^[26-27]。为了解决大面积土壤散热不满足集总参数模型的问题,傅晨钊等^[28]给出了平衡热阻和平衡热感的热路模型,可以在简化支路数的基础上,保证了计算的精度和便捷性。为了提高暂态初期的计算精度,文[29]提出了长短时模型,保证了整个暂态期间的计算精度。

文中利用稳态有限元计算得到稳态负荷电流下的稳态温升,构建了稳态转移矩阵,利用暂态有限元计算暂态负荷下的暂态温升,并以计算结果作为基准,构建复合暂态热路模型,利用遗传算法一次性求解自热和互热参数,获得复合暂态热路模型的所有参数。融合转移矩阵、复合暂态热路模型

和迭代法, 可以开展长期稳态负荷缆芯温升和突变动态增容负荷容量的准确分析。

1 地理电缆群有限元计算

目前, 有限元等数值计算方法已经获得了业界的公认, 是计算电缆群温度场和载流量的高精度方法, IEC 62095:2003 颁布了有限元数值计算的标准^[30], Cigre 也对有限元数值分析进行了详细的阐述, 并给出了计算实例^[31]。利用实验可以验证有限元计算的准确性和有效性^[27]。因此, 有限元计算结果可以作为热路等模型的有效对比和验证数据, 从而得到便于工程化应用的快速计算方法。

为了节省用地空间, 地理电力电缆往往多根电缆敷设于一个断面, 且大多平行敷设。这里选取实际运行的 7 根电缆构成的直埋电缆群, 见图 1, 所有电缆型号均为 YJV-10 kV/3×400 mm², 电缆结构见图 2, 电缆各层结构参数见表 1。

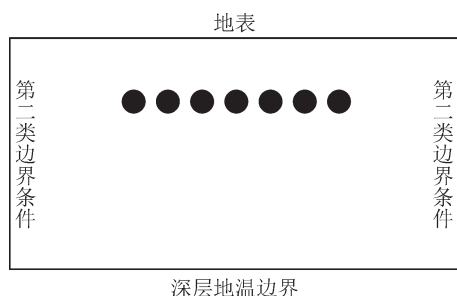


图 1 直埋电缆群示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a direct buried cable group

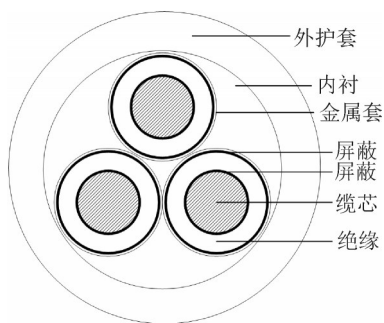


图 2 电缆结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cable construction

表 1 电缆结构参数

Table 1 Parameters of cable

构	材料	热阻系数/(K·m·W ⁻¹)	外径/mm
缆芯	铜	0.002 58	23.5
绝缘层	XLPE	3.500 00	31.5
金属套	铜丝	0.002 58	31.7
内衬	PVC	6.000 00	74.0
外护套	PVC	6.000 00	86.5

图 1 所示直埋电缆模型中, 整个场域内均为固

体传热, 在固体传热中, 任一微元体的传导传热过程中, 应始终满足能量守恒方程, 即在任一时间间隔内流入微元体的总热流量和微元体内部产生的热量之和等于同一时间间隔内流出微元体的总热流量和微元体内媒介内能的增加量。

因此, 固体导热的二维平面场微分方程形式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + q_v \quad (1)$$

式(1)中: T 为物体的瞬态温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为暂态计算过程的步长, s ; λ 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为材料的密度, kg/m^3 ; c 为材料的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; q_v 为材料的内热源, W 。在电缆缆芯、金属套和绝缘层存在损耗, q_v 取该区域的热流密度, 缆芯和金属套损耗可根据有限元直接计算, 绝缘层介质损耗可依据标准计算, 其他区域, 取 $q_v=0$ 。

在温度场计算时, 还需给出初始条件和边界条件。由图 1 可以看出, 直埋电缆的有限元模型存在 3 种边界条件。在图 1 中的下边界, 往往设定为迪利克雷边界条件, 且设定为恒定温度=当地全年平均气温, 大约为 15°C 。在两侧远离电缆的区域, 可以认为热量不再受电缆发热的影响, 可以设定为诺伊曼边界条件, 在边界两侧法向梯度上没有热交换, 在计算中不用做特殊处理。在地表, 电缆的热量通过对流换热的方式将热量传递到空气中, 可以设定为第 3 类边界条件。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_a) \quad (2)$$

式(2)中: α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_a 为地环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

整个场域内的温度初始条件设定为环境温度。给定初始条件和边界条件后, 再输入损耗, 就可以进行有限元暂态温度场分析, 最后得到缆芯的暂态温度。地理电缆群的热源来源于电缆本体的各项损耗: 缆芯电磁损耗、金属套电磁损耗和绝缘层介质损耗。图 1 地理电缆群选取 10 kV 三芯电缆, 可以忽略绝缘层介质损耗和金属套电磁损耗, 仅考虑缆芯电磁损耗。而缆芯电磁损耗与缆芯铜的电阻率密切相关, 电阻率是随温度变换的量值, 随着温度的升高, 电阻率变大, 缆芯损耗相应变大, 因此存在电磁场和温度场的热电耦合。为了探索地理电缆的温度场快速计算特性, 首先将电磁场和温度场解耦, 单独研究温度场特性, 然后再研究两场的耦合特性。

设土壤导热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 埋深为 0.7 m , 地表空气温度为 25°C , 深层地温为 15°C , 电缆间距为 0.15 m 。土壤区域设定为宽 40 m , 高 20.7 m 。设

定最左侧电缆为1号电缆,其余电缆从左至右依次编号。初期1号电缆电流为0,在0+时刻施加阶跃损耗为60 W,计算300 h的暂态温升,时间步长为5 min,利用有限元可以得到共18 000 min的1号电缆自热和其余6根电缆的互热温升。300 h后的温度场特性见图3(a),其中发热1号电缆的暂态温升见图3(b),其余6根电缆的暂态互热温升见图3(c)。

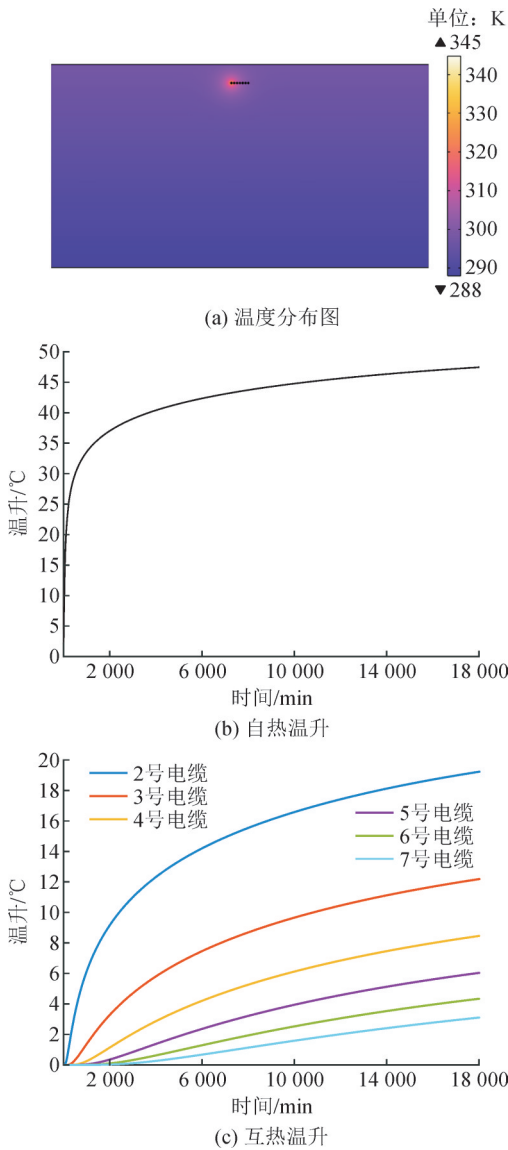


图3 有限元计算结果

Fig. 3 Results of FEM

图3中可以看出,自热温升从0+时刻即开始上升,而距离发热电缆越远,相邻电缆的互热温升越低,且热量传递到相邻电缆的时间越长,这个过程恰好说明了直埋电缆群热传递过程存在延时,难以用一个简单的集总参数热阻和热容准确地反映整个地理电缆群的热场。此外,利用有限元等数值计算方法可以有效地分析地理电缆群的稳态温升,通过热电耦合和迭代方法,可以得到地理电缆群的载

流量。但当需要确定给定暂态时间内的动态增容能力时,利用有限元等数值方法需要花费长达数十小时的时间,显然难以满足应急负荷等需要快速确定载流能力、缩短停电时间、提高供电可靠性的要求。

2 复合暂态热路模型

典型的快速计算方法是热路模型。根据前期的研究,电缆的自热可以用热阻—热容二支路模型表示,相邻电缆间的互热可以用T型的热阻和热容模型表示。以图1所计算案例为准,则可构成8支路的复合热路模型,见图4。

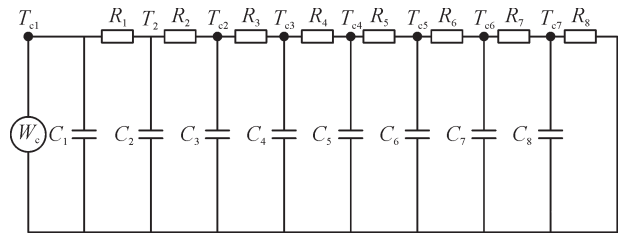


图4 8支路热路模型

Fig. 4 8 branch thermal circuit

图4中, T_{c1} 为1号加载电缆的自热缆芯温升, $T_{c2}-T_{c7}$ 为其余6根电缆的互热缆芯温升。为了提高计算精度,在加载1号电缆和相邻2号电缆间划分为两块媒介,分别用 R_1-C_1 和 R_2-C_2 两个支路表示其传热特性,较远处相邻两根电缆间的媒介等效为一种媒介,用一支路 $R-C$ 表示, C_3-C_8 表示互热容, R_3-R_8 表示互热阻。

类比于电路中的节点电流法,以每个节点总热流为0作为约束条件,可写出图4所示8支路复合热路模型的节点热流微分方程组:

$$W_c = C_1 \frac{dT_{c1}}{dt} + \frac{T_{c1} - T_2}{R_1} \quad (3)$$

$$\frac{T_{c1} - T_2}{R_1} = C_2 \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2 - T_{c2}}{R_2} \quad (4)$$

$$\frac{T_2 - T_{c2}}{R_2} = C_3 \frac{dT_{c2}}{dt} + \frac{T_{c2} - T_{c3}}{R_3} \quad (5)$$

$$\frac{T_{c2} - T_{c3}}{R_3} = C_4 \frac{dT_{c3}}{dt} + \frac{T_{c3} - T_{c4}}{R_4} \quad (6)$$

$$\frac{T_{c3} - T_{c4}}{R_4} = C_5 \frac{dT_{c4}}{dt} + \frac{T_{c4} - T_{c5}}{R_5} \quad (7)$$

$$\frac{T_{c4} - T_{c5}}{R_5} = C_6 \frac{dT_{c5}}{dt} + \frac{T_{c5} - T_{c6}}{R_6} \quad (8)$$

$$\frac{T_{c5} - T_{c6}}{R_6} = C_7 \frac{dT_{c6}}{dt} + \frac{T_{c6} - T_{c7}}{R_7} \quad (9)$$

$$\frac{T_{c6} - T_{c7}}{R_7} = C_8 \frac{dT_{c7}}{dt} + \frac{T_{c7} - T_a}{R_8} \quad (10)$$

式(3)中, W_c 为缆芯损耗。

如果式(3)-(10)中热流、热阻和热容均已知, 8个节点的暂态温升可以用4阶龙格库塔法求解

$$\begin{cases} T_{c1,n+1} = T_{c1,n} + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ T_{2,n+1} = T_{2,n} + \frac{h}{6}(L_1 + 2L_2 + 3L_3 + L_4) \\ T_{c2,n+1} = T_{c2,n} + \frac{h}{6}(M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4) \\ T_{c3,n+1} = T_{c3,n} + \frac{h}{6}(N_1 + 2N_2 + 2N_3 + N_4) \\ T_{c4,n+1} = T_{c4,n} + \frac{h}{6}(O_1 + 2O_2 + 2O_3 + O_4) \\ T_{c5,n+1} = T_{c5,n} + \frac{h}{6}(P_1 + 2P_2 + 2P_3 + P_4) \\ T_{c6,n+1} = T_{c6,n} + \frac{h}{6}(Q_1 + 2Q_2 + 2Q_3 + Q_4) \\ T_{c7,n+1} = T_{c7,n} + \frac{h}{6}(S_1 + 2S_2 + 2S_3 + S_4) \end{cases} \quad (11)$$

假定暂态工作时间为 300 h, 取 1 min 为计算时间步长, 则式(11)中 n 的取值范围为 (1 ~ 18 000)。根据 4 阶龙格库塔法格式, 可得式(11)中各系数计算关系式:

$$K_1 = \frac{1}{C_1}Q_1 - \frac{1}{C_1R_1}(T_{c1,n} - T_{2,n}) \quad (12)$$

$$L_1 = \frac{1}{C_2}\left(\frac{1}{R_1}T_{c1,n} - \frac{R_1 + R_2}{R_1R_2}T_{2,n} + \frac{1}{R_2}T_{c2,n}\right) \quad (13)$$

$$S_1 = \frac{1}{C_8}\left(\frac{1}{R_7}T_{c6,n} - \frac{R_7 + R_8}{R_7R_8}T_{c7,n} + \frac{1}{R_8}T_a\right) \quad (14)$$

$$K_2 = K_1 - \frac{h}{2C_1R_1}(K_1 - L_1) \quad (15)$$

$$L_2 = L_1 + \frac{h}{2C_2}\left(\frac{1}{R_1}K_1 - \frac{1}{R_2}L_1\right) \quad (16)$$

$$S_2 = S_1 + \frac{h}{2C_8}\left(\frac{1}{R_7}Q_1 - \frac{1}{R_8}S_1\right) \quad (17)$$

$$K_3 = K_1 - \frac{h}{2C_1R_1}(K_2 - L_2) \quad (18)$$

$$L_3 = L_1 + \frac{h}{2C_2}\left(\frac{1}{R_1}K_2 - \frac{1}{R_2}L_2\right) \quad (19)$$

$$S_3 = S_1 + \frac{h}{2C_8}\left(\frac{1}{R_7}Q_2 - \frac{1}{R_8}S_2\right) \quad (20)$$

$$K_4 = K_1 - \frac{h}{C_1R_1}(K_3 - L_3) \quad (21)$$

$$L_4 = L_1 + \frac{h}{C_2}\left(\frac{1}{R_1}K_3 - \frac{1}{R_2}L_3\right) \quad (22)$$

$$S_4 = S_1 + \frac{h}{C_8}\left(\frac{1}{R_7}Q_3 - \frac{1}{R_8}S_3\right) \quad (23)$$

在直埋电缆群中, 电缆的型号和参数不同、电缆的间距不同、土壤的热物性参数不同均会导致热阻和热容数值的变化, 往往难以直接用公式表达。如果已知一组算例, 得到了一组温升数据, 则可以根据土壤参数的变化范围、间距变化范围等给出热阻和热容的取值范围, 然后再利用遗传算法在取值

范围内以寻优计算结果与已知温升数据的方差和最小为约束条件进行寻优, 最终得到最优的电缆群热路模型的参数。在后期的暂态工况调度时, 可以直接利用所得到的热路模型进行分析和求解。

利用遗传算法寻优直埋电缆群热路模型参数的适应度函数为

$$Fitness = \sum_{j=1}^7 \left\{ \sum_{i=1}^{18000} [T_{TCM}(j,i) - T_{FEM}(j,i)]^2 \right\} \quad (24)$$

式(24)中: T_{TCM} 为热路模型计算结果; T_{FEM} 为有限元计算结果。 $T_{TCM}(1, 1) \sim T_{TCM}(1, 18\ 000)$ 为 1 号加载电缆的自热温升, $T_{TCM}(2, 1) \sim T_{TCM}(2, 18\ 000)$ 为邻近 2 号电缆的互热温升, $T_{TCM}(3, 1) \sim T_{TCM}(3, 18\ 000)$ 为 3 号电缆的互热温升, $T_{TCM}(4, 1) \sim T_{TCM}(4, 18\ 000)$ 为 4 号电缆的互热温升, $T_{TCM}(5, 1) \sim T_{TCM}(5, 18\ 000)$ 为 5 号电缆的互热温升, $T_{TCM}(6, 1) \sim T_{TCM}(6, 18\ 000)$ 为 6 号电缆的互热温升, $T_{TCM}(7, 1) \sim T_{TCM}(7, 18\ 000)$ 为 7 号电缆的互热温升。遗传算法的寻优收敛过程见图 5。

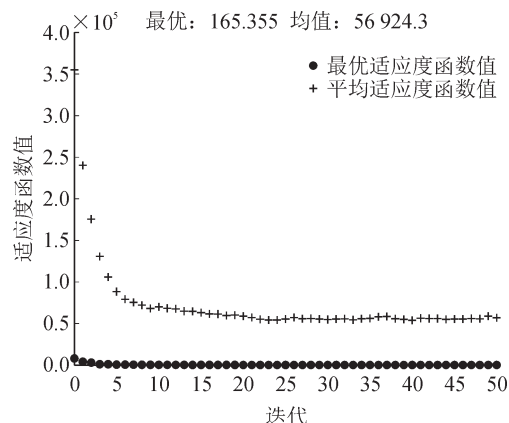


图5 寻优过程

Fig. 5 Process of optimization

遗传算法优化求解最终的最优适应度为 165.355, 根据适应度函数可以求得每个点的平均误差小于 0.1 °C, 精度较高, 可以满足工程计算要求。优化求解的复合热路模型热阻和热容参数见表 2。

表2 复合热路模型寻优结果

Table 2 Results of optimization

热容/(J·K ⁻¹)	数值	热阻/(K·m ² ·W ⁻¹)	数值
C_1	188.13	R_1	0.448 60
C_2	3 433.00	R_2	0.022 72
C_3	1 625.00	R_3	0.120 40
C_4	13 385.00	R_4	0.068 89
C_5	9 936.00	R_5	0.045 10
C_6	28 637.00	R_6	0.036 27
C_7	20 214.00	R_7	0.029 62
C_8	68 784.00	R_8	0.092 48

优化最优热阻和热容参数对应的暂态热路自热和互热温升与有限元计算结果对比结果见图6。自热温升初期误差小于2℃,大多数时间误差小于0.2℃,互热温升最大误差小于0.5℃,大多数时间误差在±0.1℃之间,热路模型计算精度较高。

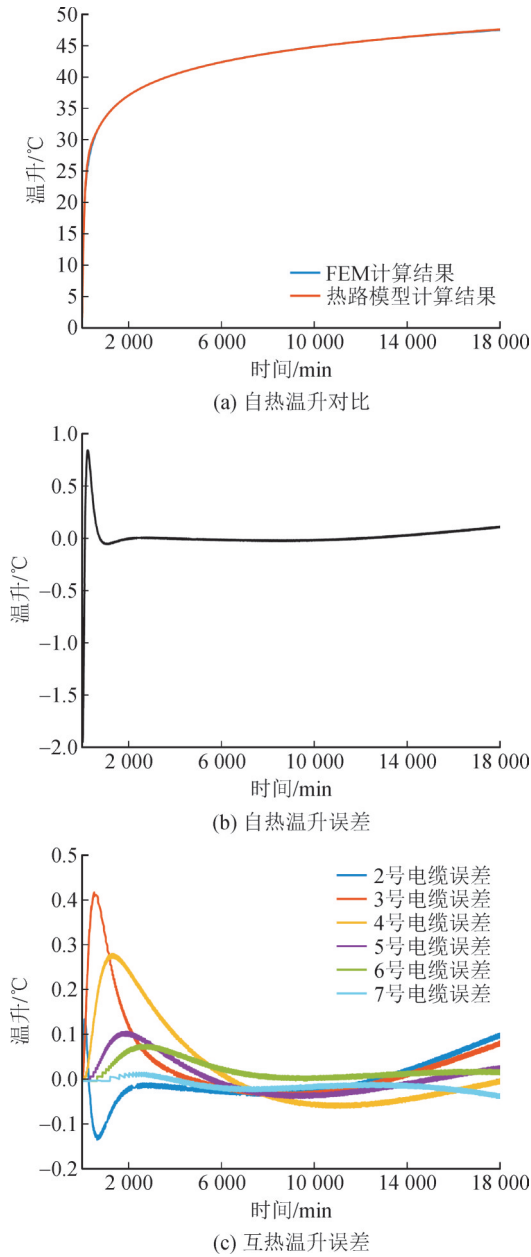


图6 自热和互热验证

Fig. 6 Verify of heat-self and mutual temperature

3 计算实例

3.1 复合热路模型验证

获得复合热路模型参数后,就可以进行所有电缆均有损耗的综合电缆群缆芯温升的计算。取环境参数相同,7根电缆缆芯损耗分别为24、36、18、21、30、15、27 W/m。由于每根电缆的型号相同,在给定各自损耗后,可以求得每根电缆的自热温升和

互热温升: $T_{ij}(i=1\sim7, j=1\sim7)$,叠加即可获得每根电缆 $T_{ci}(i=1\sim7)$ 的综合温升。

$$T_{c1} = T_{11} + T_{22} + T_{33} + T_{44} + T_{55} + T_{66} + T_{77} \quad (25)$$

$$T_{c2} = T_{12} + T_{21} + T_{32} + T_{43} + T_{54} + T_{65} + T_{76} \quad (26)$$

$$T_{c3} = T_{13} + T_{22} + T_{31} + T_{42} + T_{53} + T_{64} + T_{75} \quad (27)$$

$$T_{c4} = T_{14} + T_{23} + T_{32} + T_{41} + T_{52} + T_{63} + T_{74} \quad (28)$$

$$T_{c5} = T_{15} + T_{24} + T_{33} + T_{42} + T_{51} + T_{62} + T_{73} \quad (29)$$

$$T_{c6} = T_{16} + T_{25} + T_{34} + T_{43} + T_{52} + T_{61} + T_{72} \quad (30)$$

$$T_{c7} = T_{17} + T_{26} + T_{35} + T_{44} + T_{53} + T_{62} + T_{71} \quad (31)$$

复合热路模型计算结果与有限元计算结果进行对比,进一步验证所得复合热路模型的通用性。

1号电缆温升对比,误差和所有电缆的误差结果见图7。所有电缆的平均误差均小于1℃,最大误差在±1.5℃以内,证明电缆群在随机损耗下仍可以保证高的计算精度。

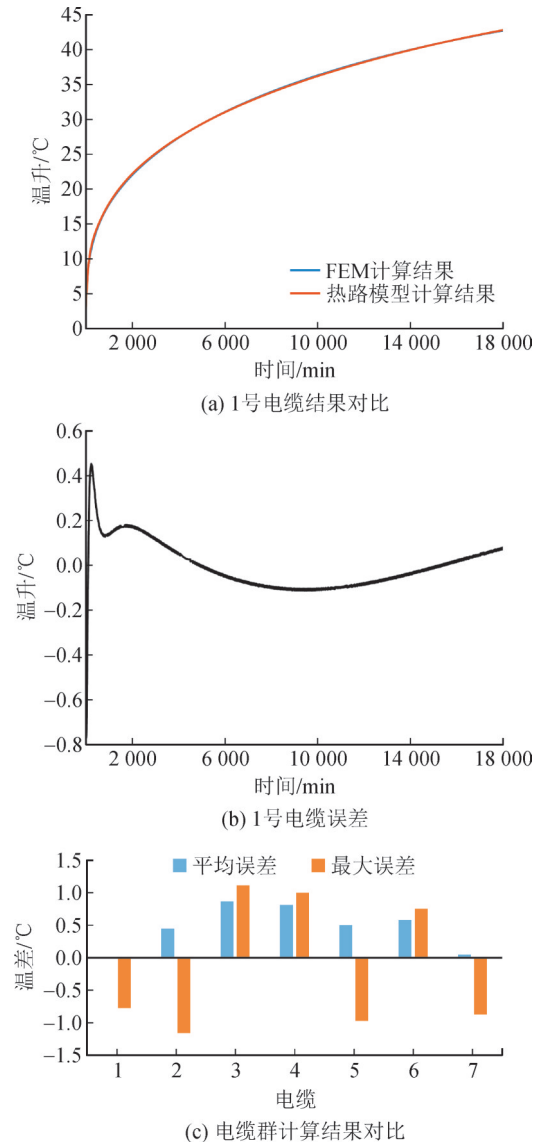


图7 复合热路模型计算电缆群温度

Fig. 7 Temperature calculation of buried cable group with composite thermal circuit

3.2 复合热路模型热电耦合

在暂态过程中,随着温度的升高,缆芯电阻率不断增大,缆芯损耗不断增大,其缆芯温度也比仅考虑恒定损耗时要大。以 1 min 为时间步长,进行 18 000 min 的暂态计算,而 1 min 以内温度的变化往往在几℃以内,可以认为电阻率不变,而每个时间步进行一次电阻率和损耗的更新,则可以得到整个暂态过程中的热电耦合结果。当 7 根电缆电流为 200、350、400、250、180、450、320 A 时,分别用复合暂态热路模型和有限元计算的暂态热电耦合计算结果对比见图 8,复合暂态热路模型计算结果均高于有限元计算结果,但最大误差小于 1℃。

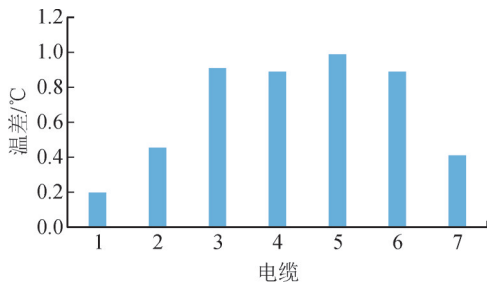


图 8 复合热路模型热电耦合对比误差

Fig. 8 Electromagnetic coupling error of composite transient thermal circuit and FEM analysis

4 热电耦合计算动态载流量

4.1 热电耦合稳态温升计算

实际运行中,电缆群的额定载流量可以提前由

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0.9088 & 0.4341 & 0.3152 & 0.2504 & 0.2063 & 0.1735 & 0.1477 \\ 0.4341 & 0.9088 & 0.4341 & 0.3152 & 0.2504 & 0.2063 & 0.1735 \\ 0.3152 & 0.4341 & 0.9088 & 0.4341 & 0.3152 & 0.2504 & 0.2063 \\ 0.2504 & 0.3152 & 0.4341 & 0.9088 & 0.4341 & 0.3152 & 0.2504 \\ 0.2063 & 0.2504 & 0.3152 & 0.4341 & 0.9088 & 0.4341 & 0.3152 \\ 0.1735 & 0.2063 & 0.2504 & 0.3152 & 0.4341 & 0.9088 & 0.4341 \\ 0.1477 & 0.1735 & 0.2063 & 0.2504 & 0.3152 & 0.4341 & 0.9088 \end{bmatrix} \quad (32)$$

为了实现工程中的便捷计算,电缆的电流与损耗之间的关系可以提前进行拟合,图 1 案例中电缆电流与损耗的之间的拟合关系为

$$Q = 0.000132 \cdot I^2 \quad (33)$$

初始损耗由式(33)计算,随后采用迭代的方法实现热电耦合(根据损耗利用转移矩阵计算缆芯温度;由温度更新缆芯电阻率,更新损耗;由新的损耗再次计算缆芯温度;重复 5 次计算,温度即可收敛)。设初始环境温度 25℃,7 根电缆的电流为 200、350、400、250、180、450、320 A,利用转移矩阵和有限元热电耦合计算得到的缆芯稳态温度误差分布见

设计人员采用多种方法计算得到,但当出现应急负荷工况时,电力运维部门关注的是快速得到实时动态载流能力,因此需要将复合暂态热路模型应用于动态载流量计算。

动态载流量的计算往往与暂态温升计算密切相关,且需要知道稳态负荷电流下的电缆缆芯初温,为了实现快速计算,这里采用转移矩阵的方法计算缆芯的初温^[32]。

以图 1 所示案例,同样给 1 号电缆加 60 W 的损耗,其余电缆不加损耗,进行稳态有限元分析,可以得到稳态温度场计算结果,见图 9,从而得到 7 根电缆的缆芯温升为 54.53、26.05、18.91、15.02、12.38、10.41、8.86℃。

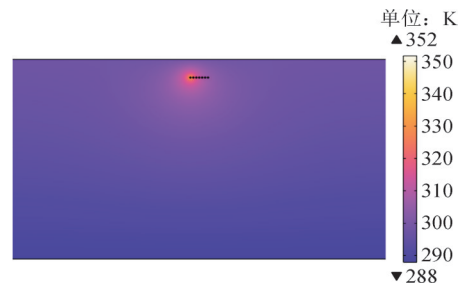


图 9 有限元稳态温度计算结果

Fig. 9 Results of steady state FEM analysis

可以计算出自热阻和互热阻,根据电缆的相互位置关系,可以得到该电缆群的转移矩阵 \mathbf{x} 。利用转移矩阵可以实现给定损耗下的缆芯温升计算。

图 10,仅有一根电缆的误差超过了-1℃,但仍在-1.2℃以内,其余电缆的误差均在-0.8℃以内。

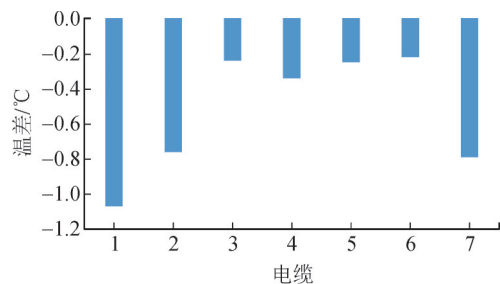


图 10 稳态转移矩阵误差

Fig. 10 Error of steady-state transfer matrix

4.2 实时动态载流能力评估

在以上稳态运行负荷的基础上,利用迭代的方法可以求解增容电流。设定0+时刻要进行动态增容,增容电流运行时间为144 h,由2号电缆承载增容电流。0时刻7根电缆负荷电流为200、350、400、250、180、450、320 A,且稳态缆芯温度为58.63、70.35、76.14、69.33、67.43、78.63、67.47 ℃。最大温度为78.63 ℃,2号电缆的缆芯温度为70.35 ℃,线路存在增容空间。

设定2号电流最小值为350 A,最大电流取 $350 \times 1.5 = 525$ A,通过最大电流计算得到的缆芯温度与90 ℃的差值,不断调整最大电流和最小电流,当计算得到的最大缆芯温度与90 ℃的差值小于0.1 ℃时,可以计算得到2号电缆可增容负荷至522.6 A。增容144 h各电缆的缆芯温度变换曲线见图11。除了增容电缆缆芯温度升高到90 ℃外,其余电缆的温升同样有了明显的升高,但均未超过90 ℃,所有电缆均在安全工作范围内。

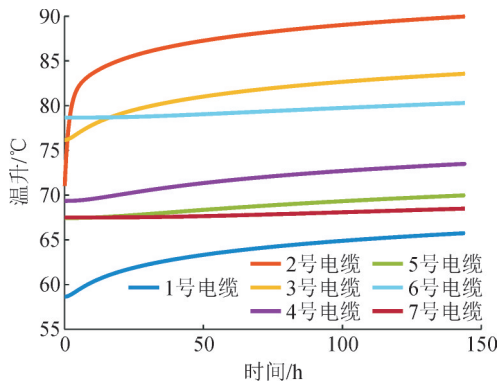


图11 动态增容缆芯温度

Fig. 11 Core temperature of dynamic current

计算采用的硬件配置为:14th Gen Intel(R) Core (TM) i7-13700K处理器,内存96.0 GB,硬盘3.64 TB,整个计算过程耗时97.6 s,远低于有限元数个小时的计算时长,可以满足应急负荷等快速调度的需求。

5 结论

针对有限元计算精度高,但计算时间长,难以满足工程中应急负荷下快速计算动态增容能力的需求,在分析地理电缆群温度特性的基础上,提出了一种复合暂态热路模型,给出暂态热路模型的求解方法,以及在转移矩阵稳态温升分析的基础上,实现动态增容容量的计算。通过研究和对比可以得出如下结论:

1)复合暂态热路模型直接反映了直埋电缆群的自热和互热关系,针对已经敷设好的线路,通过提

前优化求解得到完整的复合暂态热路模型结构和龙格库塔计算程序,在后期负荷运维中可以直接使用,提高了线路负荷管理的便利性和快速性。

2)复合热路模型是以有限元为基准的,保证了复合热路模型的计算准确性,对比也表明了复合热路模型的计算结果在大多数暂态时间内与有限元结果的偏差在 ± 0.2 ℃以内,具有较高的精度。

3)通过每个时间步的电阻率更新,可以直接实现暂态计算过程中的热电耦合,与有限元热电耦合计算结果相比,计算误差在1 ℃以内,满足工程调度的要求。

4)通过迭代,利用转移矩阵可以得到在运负荷电流下的电缆群缆芯稳态温升,以此为初始条件,可以利用复合暂态热路模型可以计算应急工况下的实时动态增容负荷,为应急负荷工况的负荷实时管理提供了工具。

参考文献:

- [1] DOUGLASS D A, GENTLE J, NGUYEN H M, et al. A review of dynamic thermal line rating methods with forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2100-2109.
- [2] 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.
- [3] GIGLIO D A, DE LEÓN F. Dynamic thermal model for different size trefoil power cables with various loads in non-forced-ventilated tunnels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1286-1296.
- [4] 刘文博, 谢茂杰, 周游, 等. 土壤微观结构参数对埋地电缆温度与载流量的影响分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 776-785.
LIU Wenbo, XIE Maojie, ZHOU You, et al. Effects of microstructural parameters of soil on temperature and ampacity of the buried cables[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 776-785.
- [5] BLACK W Z, PARMER D, PATEL N, et al. Extended thermal probe method for measuring thermal stability of soils surrounding buried power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5169-5178.
- [6] 牛海清, 郑文坚, 雷超平, 等. 基于有限元和粒子群算法的电缆周围土壤热特性参数估算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1557-1563.
NIU Haiqing, ZHENG Wenjian, LEI Chaoping, et al. Estimation method for thermal parameters of soil around the cable based on finite element and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1557-1563.
- [7] 严亚兵, 江志文, 肖俊先, 等. 基于高频电流信号的电缆局部放电故障特征分析研究[J]. 供用电, 2024, 41(3): 96-102.
YAN Yabing, JIANG Zhiwen, XIAO Junxian, et al. Fault characteristics analysis of cable partial discharge based on the high frequency current signal[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 96-102.
- [8] 张淦璋, 陈子鉴, 马超俊, 等. 基于电场逆计算的三相电缆电压

- 非接触测量方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 167-175.
- ZHANG Songhui, CHEN Zijian, MA Chaojun, et al. Non-contact measurement method of three-phase cable voltage based on inverse calculation of electric field[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 167-175.
- [9] Electrical cables-calculation of the current rating: IEC 60287: 2014 [S]. 2014.
- [10] 电缆载流量计算第1部分: 载流量计算公式(100%负荷因数)和损耗计算: JB/T 10181.1—2014[S]. 2014.
Calculation of cable ampacity, Part 1: Ampacity calculation formulas (100% load factor) and loss calculations: JB/T 10181.1—2014 [S]. 2014.
- [11] 电缆载流量计算第2-1部分: 18/30(36) kV 及以下电缆周期性负载和事故过载的计算: JB/T 10181.2—2000[S]. 2000.
Calculation of cable ampacity, Part 2-1: Calculation of cyclic and emergency overload ratings for cables up to 18/30(36) kV: JB/T 10181.2—2000[S]. 2000.
- [12] Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables: IEC 60853: 2002[S]. Geneva: IEC Publication, 2002.
- [13] OU Xianpeng, XU Wenjie, ZANG Yuanyuan, et al. Mechanical analysis of 500 kV oil-filled submarine power cable in anchor and blade damage based on finite element method[C]//2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). China: IEEE, 2022: 1068-1072.
- [14] DEMIROL Y B, KALENDERLI Ö. Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis [J]. Electric Power Systems Research, 2024(227): 109987.
- [15] LIANG Yongchun. Steady-state thermal analysis of power cable systems in ducts using streamline-upwind/ Petrov-galerkin finite element method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 283-290.
- [16] 张振鹏, 赵健康, 饶文彬, 等. 电缆分布式光纤测温系统测量结果符合性的比对试验[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1362-1367.
ZHANG Zhenpeng, ZHAO Jiankang, RAO Wenbin, et al. Validate test for the calculation congruity of distributed temperature sensing system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1362-1367.
- [17] CHEN Yu, WANG Shuang, HAO Yi, et al. Temperature monitoring for 500 kV oil-filled submarine cable based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology: Method and application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 1-10.
- [18] SINGH R S, COBBEN S, ČUK V. PMU-based cable temperature monitoring and thermal assessment for dynamic line rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1859-1868.
- [19] 余兆荣, 牛海清, 庄小亮, 等. 直埋配电电缆应急负荷载流量的试验及其应用[J]. 绝缘材料, 2014, 47(5): 82-86.
YU Zhaorong, NIU Haiqing, ZHUANG Xiaoliang, et al. Emergency load ampacity experiment of buried distribution cable and its application[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 82-86.
- [20] 刘刚, 雷成华. 提高单芯电缆短时负荷载流量的试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1288-1293.
LIU Gang, LEI Chenghua. Experimental analysis on increasing temporary ampacity of single-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1288-1293.
- [21] 李文祥, 刘刚, 王振华, 等. XLPE 三芯电缆稳态并联热路模型及实验验证[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 57-62.
LI Wenxiang, LIU Gang, WANG Zhenhua, et al. Steady-state parallel thermal circuit model for three-core XLPE cable and its experimental verification[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 57-62.
- [22] 刘刚, 王鹏宇, 周凡, 等. 电力电缆暂态热路模型中绝缘层的优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1549-1556.
LIU Gang, WANG Pengyu, ZHOU Fan, et al. Optimization on the insulating layer of transient thermal circuit model of power cable [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1549-1556.
- [23] 李新海, 陈昱, 刘均裕, 等. 考虑轴向散热的 10 kV 三芯电缆中间接头稳态热路模型分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 56-62.
LI Xinhai, CHEN Yu, LIU Junyu, et al. A steady state thermal circuit model analysis of the 10 kV 3-core cable joint considering axial heat dissipation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 56-62.
- [24] 马爱清, 张杨欢. 考虑互热效应的超高压电缆隧道敷设热路模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1068-1076.
MA Aiqing, ZHANG Yangchuan. Hot path laying model of ultra-high voltage cable tunnel considering mutual heat effect[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1068-1076.
- [25] WANG Pengyu, MA Hui, LIU Gang, et al. Dynamic thermal analysis of high-voltage power cable insulation for cable dynamic thermal rating[J]. IEEE Access, 2019(7): 56095-56106.
- [26] DIAZ-AGUILÓ M, DE LEÓN F, JAZEBI S, et al. Ladder-type soil model for dynamic thermal rating of underground power cables[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2014(1): 21-30.
- [27] LUX J, CZERNIUK T, OLSCHIEWSKI M, et al. Non-concentric ladder soil model for dynamic rating of buried power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 235-243.
- [28] 傅晨钊, 司文荣, 祝令瑜, 等. 土壤直埋单芯电缆暂态温升计算模型的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 158-163.
FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Research on the calculation model for transient temperature rise of straight buried single-core cable[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 158-163.
- [29] 梁永春, 王婧雅. 基于热路模型和瞬态伴随模型的直埋电缆暂态缆芯温升计算[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3517-3525.
LIANG Yongchun, WANG Jingya. Transient temperature rise calculation of buried power cable based on thermal circuit model and transient adjoint model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3517-3525.
- [30] Electric cables-calculation for current ratings-finite element method: IEC 62095: 2003[S]. 2003.
- [31] Finite element analysis for cable rating calculations: TB 963—2025 [S]. 2025.
- [32] 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): 134-139.
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): 134-139.