

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.022

基于转移矩阵的土壤直埋电缆群稳态温升 快速算法研究

傅晨钊¹, 司文荣¹, 祝令瑜², 李红雷¹, 姚周飞¹

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200000; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 文中研究了一种基于转移矩阵和热传导场可叠加原理的方法, 以实现复杂土壤直埋电缆群稳态温升的快速计算。将电缆群的共同作用离散为多根电缆单独作用的组合, 两两间的相互影响利用转移系数描述, 进而通过有限元计算获得表征电缆群热学特性的转移矩阵, 从而实现快速计算。在算例验证中, 分别用有限元方法和文中所述方法计算了6根直埋土壤电缆群的温升, 并对结果进行对比, 证明了基于转移矩阵快速算法求解的准确性。之后利用有限元计算和通用软件CYMCAP提取转移矩阵后计算温升, 进一步验证了方法的有效性。

关键词: 转移矩阵; 土壤直埋; 电缆群; 温升; 有限元

Fast Calculation Method for Steady Temperature Rise of Buried Cable Group Based on Transfer Matrix

FU Chenzhao¹, SI Wenrong¹, ZHU Lingyu², LI Honglei¹, YAO Zhoufei¹

(1. State Grid Shanghai Electrical Power Research Institute, Shanghai 200000, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize rapid calculation of steady temperature rise of complex buried cable group, a method based on the transfer matrix and the superposition principle of heat conductive field is proposed. The combined effect of the cable group is discretized into independent effects of multiple conductors. Then, the transfer matrix characterizing the thermal properties of the cable group can be obtained with the finite element calculation. In an example, the temperature rise of a buried cable group with six cables is calculated with the finite element method and the proposed method, respectively. The result obtained by the proposed fast calculation method based on transfer matrix is consistent with that by the finite element method, which verifies the accuracy of the proposed method. Besides, the software CYMCAP is adopted to extract the transfer matrix and then calculate the temperature rise, and comparison of the thus obtained result with that of the finite element method further verifies the availability of the proposed fast calculation method.

Key words: transfer matrix; straight buried; cable group; temperature rise; finite element

0 引言

随着城市建设及电力系统的发展, 输配电线路逐步由架空线路敷设转向地下电缆敷设, 且越来越趋向于密集布置, 具有运行可靠、不易受外界影响、不需架设电杆、不占地面等优点^[1]。由于电缆工作于地下, 环境密闭且散热条件一般, 线芯导体损耗、金

属护套和铠装层涡流损耗、环流损耗以及绝缘介质损耗等引起的温升, 造成了高压电缆本体温度升高, 可能影响绝缘老化的速度和使用寿命。因此实现电缆群稳态温升的快速计算对于保证其安全可靠运行意义重大。

对于土壤直埋电缆群而言, 多个回路密集敷设在一起, 相互直接的电磁耦合和热相互作用强烈, 其温升的快速计算十分困难。目前, 电缆群稳态温升计

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-07-26

算有解析法、数值法以及试验等 3 种方法^[2-13]。其中, 解析计算主要是基于 IEC-60287—1993 (国内相对应的标准是 JB/T 10181—2000) 和 N-M 理论, 适用于简单电缆系统和边界条件^[14-15]; 数值计算主要有边界元法、有限差分法和有限元法, 可以模拟实际的边界条件, 适用于比较复杂的电缆系统, 计算量巨大, 需要丰富的专业知识与计算工具, 具体实施中效率较低^[16-18]; 根据实际敷设情况, 电缆温升也可以通过预先埋设的光纤测温系统测量获得, 但对于无预埋光纤测温单元的电缆群显然并不适用, 且硬件投资不菲, 运维难度较大, 可靠性较差, 无法满足调度运行的实时需要。

从上述电缆稳态温升计算分析的研究现状可以看出, 目前尚缺乏适应复杂电缆群温升快速计算的有效方法。基于热场的叠加原理, 本文通过有限元计算获得的集总参数转移矩阵来反映土壤直埋电缆周围的热学特性, 以期能够适应不同的散热条件, 进而实现多工况、多种边界条件、多回土壤直埋电缆稳态温升的快速计算。

1 计算原理

对于土壤直埋电缆群来说, 电缆本体及土壤中的热扩散主要以热传导的形式进行。由于电力电缆群线路长度相对于电缆截面及热扩散断面来说, 近似于无穷大, 因此土壤直埋电力电缆热场可以简化为二维热场模型进行分析和计算^[19]。在热传导形式占据主要作用的前提下, 电缆热流量与其温升之间是线性关系^[20]。利用热场的叠加原理^[21], 将多回电缆的共同作用离散为多根电缆单独作用的组合, 将两两之间的相互影响以转移系数来描述, 进而形成集总参数构成的转移矩阵, 即可实现多工况、多回电缆稳态温升的快速计算。

1.1 单一边界散热条件

假设热场各边界散热温度恒定。设电缆的编号分别为 1~i, 其中 a_{11} 为电缆 1 自身发热的热导; a_{12} 为计及电缆 2 对电缆 1 影响的互热导, 根据对偶原则, $a_{12}=a_{21}$, 其余类似, 定义这些系数组成“转移矩阵”为

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,i-1} & a_{1,i} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,i-1} & a_{2,i} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & a_{i-1,2} & \cdots & a_{i-1,i-1} & a_{i-1,i} \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \cdots & a_{i,i-1} & a_{i,i} \end{bmatrix}。$$

定义电缆温升矩阵及热流量矩阵分别为: $T=[t_1, t_2, \cdots, t_i]^T$ 和 $Q=[q_1, q_2, \cdots, q_i]^T$, 则可得矩阵方程为

$$AT=Q。 \quad (1)$$

从式(1)可见, 转移矩阵的确定并不依赖于电缆本身发热量, 只与周围介质等热特性参数相关, 而这些参数在正常运行温度范围内可认为基本不变。因此, 利用技术手段得到转移矩阵后, 在已知各回电缆电流的情况下, 无需重复有限元或其他数值计算, 直接通过式(1)与简单的迭代计算, 即可获得待解工况下的各电缆温升结果。观察式(1), 其与电路分析中的节点电压法表示基本一致, 这为后续利用热电比拟法讨论热场问题提供了理论依据。

1.2 非单一散热边界条件

实际应用中经常存在非单一的散热边界条件, 即热场计算的各边界散热温度或边界条件并不相等^[22], 此时需要对式(1)进行适当调整。以下以两种不同环温的散热边界条件为例, 通过热电比拟来说明调整方法。利用电压源模拟两种散热边界环温的温差, 以两根电缆为例进行描述, 构建此条件下的热路模型见图 1。图 1 中, 设定 V_1 为电缆所处散热边界的温度差值; g_1, g_5 分别为为两回电缆的自身热导; g_2, g_4 分为为两回电缆散热边界所对应的热导; g_3 为表征两根电缆相互影响的互热导; I_1 和 I_2 分为为两根电缆的热流。

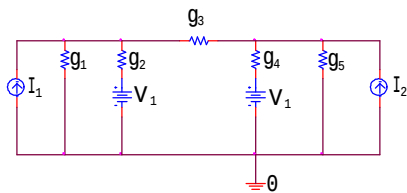


图 1 两根电缆的热路模型

Fig. 1 Circuit diagram of two kinds of heat dissipations

借鉴节点电压法, 将“电压源”变换为“电流源”, 其中 $I_3=V_1g_2, I_4=V_1g_4$, 图 1 所示的热路模型转化为热路模型见图 2。两根电缆 g_1, g_5 节点处的电压分别为 u_1 和 u_2 , 可得

$$\begin{bmatrix} g_1+g_2+g_3 & -g_3 \\ -g_3 & g_4+g_5+g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1+i_3 \\ i_2+i_4 \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

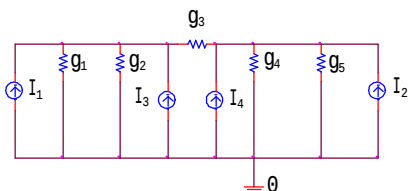


图 2 变换后的热路模型

Fig. 2 Circuit diagram of two kinds of heat dissipations using the node voltage method

由于 $I_3=V_1g_2, I_4=V_1g_4$, 因此可将式(2)变换为

$$\begin{bmatrix} g_1+g_2+g_3 & -g_3 & -g_2 \\ -g_3 & g_4+g_5+g_3 & -g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

同样方法,可调整式(1)及相关矩阵来适应多种散热条件。

2 电缆群稳态温升快速算法的实际应用

2.1 转移矩阵的求解

2.1.1 有限元计算

有限元计算需要考虑所选计算工况的正交性与计算工况的数量,这取决于同截面电缆的回路数量。以下以6根直埋土壤电缆群,两种边界条件的组合为例进行实际应用的说明。

土壤直埋电缆群布置结构见图3。

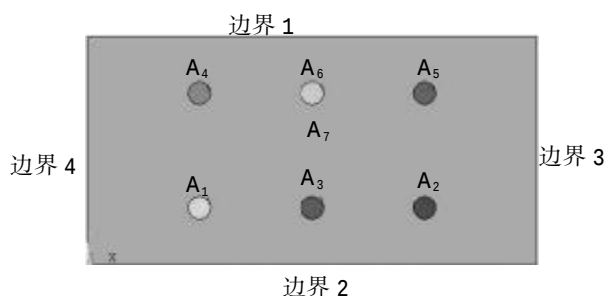


图3 土壤直埋电缆群布置结构图

Fig. 3 Structural layout of buried cable groups in soil

重复若干次计算,即可获得在给定发热量条件下每根电缆的温升,有限元计算的结果汇总见表1。表1中,计算工况的数量应不少于截面电缆回路

图3中: A_1-A_6 为6根电缆截面,流过每根电缆的载流量任意。其中,第3类边界条件:边界1对应的对流散热系数为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度为随机;第1类边界条件:边界2、3、4均设为温度 30°C 。由于单芯电缆是一个轴对称结构,各个方向热阻相同。考虑到高压电力电缆往往包含多层结构,采用调和平均法进行简化,将多层电缆中导体外各层结构等效为一层等效外护层,该例中调和导热系数设为 $23.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,土壤换热系数为 $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

某一工况的计算结果见图4,由此可以获得每根电缆的温升值。

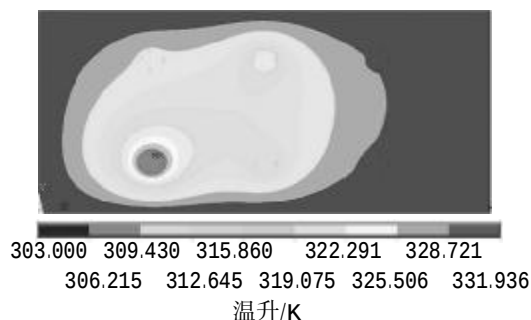


图4 电缆群热场分布云图

Fig. 4 Calculation results under a certain working condition

数,且保证电缆电流损耗矩阵正交化。实际应用时,可多选择一些计算工况,以确保有效计算工况的正交化。

表1 有限元计算结果

Table 1 Finite element calculation results

工况	q_1/W	q_2/W	q_3/W	q_4/W	q_5/W	q_6/W	t_1/K	t_2/K	t_3/K	t_4/K	t_5/K	t_6/K	散热温差/K
1	0.00	82.43	54.35	42.20	48.51	66.56	8.25	36.11	30.02	25.89	31.81	40.13	7.76
2	3.93	78.50	36.82	25.14	62.23	45.70	6.38	32.98	21.14	14.03	30.6	26.12	0.07
3	7.85	74.58	5.50	27.26	8.83	41.58	8.13	29.64	11.21	21.2	17.58	29.08	13.90
4	11.78	70.65	49.59	11.85	60.61	43.54	11.66	33.53	28.81	20.9	40.94	38.05	19.79
5	15.70	66.73	63.13	65.66	9.28	59.58	14.84	29.41	32.57	35.72	17.85	38.38	9.55
6	19.63	62.80	46.38	4.97	28.87	1.73	11.58	27.09	23.10	13.07	23.53	16.62	14.27
7	23.55	58.88	66.17	24.97	48.21	60.85	15.72	28.58	33.56	21.39	31.26	38.63	9.06
8	27.48	54.95	7.59	45.48	30.11	4.68	14.88	23.39	10.94	27.30	23.03	17.49	14.15

2.1.2 转移矩阵的获得

根据上节分析,可写出该例的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} & a_{1,6} & a_{1,0} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & a_{2,6} & a_{2,0} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} & a_{3,6} & a_{3,0} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} & a_{4,6} & a_{4,0} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} & a_{5,6} & a_{5,0} \\ a_{6,1} & a_{6,2} & a_{6,3} & a_{6,4} & a_{6,5} & a_{6,6} & a_{6,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)与表1数据,可求解得到文中算例下的

转移矩阵 A 如下所示,转移矩阵中的对角元素基本相等,说明了计算的准确。

$A=$

$$\begin{bmatrix} 3.028 & -0.011 & -0.282 & -0.388 & -0.010 & -0.128 & -0.085 \\ -0.011 & 3.028 & -0.282 & -0.009 & -0.388 & -0.128 & -0.086 \\ -0.281 & -0.281 & 3.026 & -0.129 & -0.129 & -0.394 & -0.095 \\ -0.388 & -0.011 & -0.128 & 2.834 & -0.011 & -0.331 & -1.301 \\ -0.010 & -0.388 & -0.128 & -0.012 & 2.834 & -0.331 & -1.300 \\ -0.128 & -0.127 & -0.395 & -0.330 & -0.330 & 2.829 & -1.342 \end{bmatrix}$$

2.1.3 转移矩阵的验算

设定初始热流量为 $Q_0=[10,20,30,40,50,60]$, $V_1=$

30,通过有限元与转移矩阵分别求得温升见表 2。
由表 2 可见, 基于转移矩阵与基于有限元的计算结果偏差非常小,基本保持一致。

表 2 有限元与转移矩阵计算对比
Table 2 Comparison of finite element method and transfer matrix

计算结果	有限元	转移矩阵	K
t_1	13.30	13.29	0.01
t_2	17.10	17.09	0.01
t_3	23.39	23.38	0.01
t_4	36.73	36.73	0.00
t_5	40.75	40.75	0.00
t_6	49.10	49.10	0.00

2.2 稳态温升的迭代求解

获得转移矩阵后,利用式(1)或其调整,即可获得热流量矩阵 Q 与温升矩阵 T 之间的关系。考虑到热流量是单位时间内通过单位截面积的热量,其大小为温度的函数,一般还需要通过一定的迭代。

具体步骤如下:

1)假定环境温度 T_0 下的热流量,取 $Q_i=I_i^2R(1+kT_0)k_1$,其中 I_i 为流过第 i 回电缆的电流; R 为第 i 回电缆在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的直流电阻; k 为电阻的温度系数; k_1 为考虑耦合影响、涡流损耗等的折算系数,其余各回电缆均如此。因此可以形成环境温度 T_0 下的热流量矩阵 Q_0 ,考虑不同散热边界条件后形成“折算 Q_0 ”。

2)利用转移矩阵,求解得到温升矩阵 T_1 。

3)如温升矩阵 T_0 与温升矩阵 T_1 对应的各元素间最大差异大于 0.1 K ,利用 T_1 代替 T_0 ,形成新的热流量矩阵。

4)如此重复,直至温升矩阵中对应的各元素间最大差异小于 0.1 K ,认为计算收敛,此时的温升即为稳态温升。

迭代求解过程数据见表 3。从表 3 可以看出,经过 3 次迭代计算后,得到的 T_3 与 T_2 之间的差异已经小于 0.1 K ,从而计算获得了稳态温升。

3 与 CYMCAP 的比较

为进一步验证文中方法的有效性,利用电缆载流量通用软件 CYMCAP 进行了矩阵提取与结果比较。计算模型含 4 根单芯电缆,1 回三芯电缆,模型见图 5,电缆参数见表 4,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

变换电缆电流后,应用 CYMCAP 进行计算可得各工况对应的电缆损耗与温升,见表 5。

由上可得,转移矩阵为

表 3 迭代过程数据

Table 3 Iterative process data					
Q_0	折算 Q_0	T_0	Q_1	折算 Q_1	T_1
10	12.55	13.29	10.37	12.92	13.98
20	22.58	17.09	20.94	23.52	18.04
30	32.88	23.38	31.93	34.81	24.85
40	79.04	36.73	44.04	83.08	38.76
50	89.01	40.75	55.61	94.62	43.37
60	100.24	49.10	68.11	108.34	52.79
↓					
Q_3	折算 Q_3	T_3	Q_2	折算 Q_2	T_2
10.39	12.94	14.03	10.38	12.94	14.02
21.00	23.58	18.10	20.99	23.58	18.10
32.06	34.94	24.95	32.05	34.93	24.95
44.28	83.32	38.89	44.27	83.30	38.89
55.99	95.00	43.55	55.97	94.98	43.54
68.76	109.00	53.07	68.72	108.95	53.05

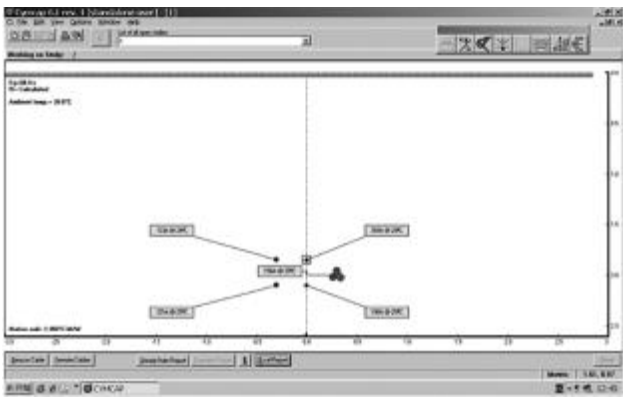


图 5 CYMCAP 计算模型

Fig. 5 Calculate model in CYMCAP

表 4 计算参数

Table 4 Parameters of calculation				
电缆	位置		电压/kV	截面面积/mm ²
	X/m	Y/m		
1	-0.300	1.850	44	507.0
2	0.000	1.850	44	507.0
3	-0.300	2.100	44	507.0
4	0.000	2.100	44	507.0
5a	0.262	2.022	138	886.5
5b	0.338	2.022	138	886.5
5c	0.300	1.956	138	886.5

$A= \begin{bmatrix} 1.161 & 0.401 & 0.432 & 0.374 & 0.298 \\ 0.401 & 1.157 & 0.352 & 0.469 & 0.395 \\ 0.432 & 0.352 & 1.198 & 0.414 & 0.306 \\ 0.374 & 0.469 & 0.414 & 1.133 & 0.430 \\ 0.298 & 0.395 & 0.306 & 0.430 & 0.797 \end{bmatrix}$ 。

将转移矩阵用于待解算例及相应迭代, 结果见表 6。

表 5 计算工况与结果

Table 5 Results and calculation cases

电缆 1			电缆 2			电缆 3			电缆 4			电缆 5		
电流/A	损耗/W	温升/K	电流/A	损耗/W	温升/K	电流/A	损耗/W	温升/K	电流/A	损耗/W	温升/K	电流/A	损耗/W	温升/K
123	0.56	24.20	359	4.76	27.50	221	1.80	25.10	106	0.41	24.60	156	2.49	24.80
139	0.71	39.10	380	5.33	46.30	405	6.06	43.70	397	5.82	47.80	701	38.61	57.60
925	31.62	73.70	819	24.78	69.10	454	7.61	56.10	259	2.48	52.70	348	9.96	50.90
597	13.17	45.60	257	2.44	38.10	517	9.87	43.70	370	5.06	40.40	362	10.74	38.80
126	0.59	58.80	730	19.69	74.40	978	35.35	85.30	808	24.12	80.20	499	19.86	65.50

表 6 计算工况与结果比较

Table 6 Comparison for calculation cases

待解 算例	电缆 1	电缆 2	电缆 3	电缆 4	电缆 5
	电流/A	电流/A	电流/A	电流/A	电流/A
	392	196	513	230	649
	897	421	776	619	434
CAY CAP	电缆 1	电缆 2	电缆 3	电缆 4	电缆 5
	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K
	21.80	21.30	25.40	22.60	32.60
	56.50	39.80	52.30	46.10	36.80
转移 矩阵	电缆 1	电缆 2	电缆 3	电缆 4	电缆 5
	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K
	21.97	21.35	25.57	23.30	32.53
	56.57	39.97	52.31	45.98	36.45
	电缆 1	电缆 2	电缆 3	电缆 4	电缆 5
	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K	温升/K
	72.00	45.60	54.56	46.33	46.56

上例表明,转移矩阵的获得可通过有限元计算、通用软件等不同方法;矩阵确定后,已知热流量或电流的条件下,可准确、快速的得到对应的温升。

4 结论

笔者主要围绕土壤直埋电缆群稳态温升快速算法展开研究,主要得到以下结论:

1)利用热场的叠加原理,将土壤直埋电缆群的相互影响以转移系数来描述,形成集总参数构成的转移矩阵,即可实现多工况、多回电缆稳态温升的快速计算;

2)表征电缆群热学特性的转移矩阵获得后,已知热流量或温升的条件下,可准确、快速的计算得到对应的温升或热流量,与通行有限元方法与通用电缆计算软件 CYMCAP 的对比结果验证了该方法的有效性与准确性。

展望未来工作,为对运行中电缆温升的有效评估,将在在转移矩阵(即稳态模型)的基础上,利用数值仿真与模拟试验等方法开展以下工作:

1)讨论转移矩阵法用于管道、隧道埋设方式下

多回电缆稳态温升计算的可行性及必要的修正方式;

2)讨论土壤直埋、管道、隧道等方式下,不依赖于表面温度监测的单芯电缆暂态温升模型与多回电缆暂态温升模型。

参考文献:

- [1] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7):100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7):100-104.
- [2] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
LIANG Yongchun. Numerical calculation of ampacity of high voltage cables[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] DIAZ-AGUILÓN, 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.
- [4] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2013.
MA Guodong. Electric wire and cable capacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [5] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
LUO Tao. The study on the temperature field and ampacity calculation of power cables[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [6] 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.
- [7] 牛海清,周鑫,王晓兵,等. 外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9):2138-2143.

- NIU Haiqing, ZHOU Xin, WANG Xiaobing, et al. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2138-2143.
- [8] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 52-54.
- ZHAO Jianhua, YUAN Hongyong, FAN Weicheng, et al. Surface temperature field based online diagnoses study for electric cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 52-54.
- [9] SALLY M, BLACK W Z. Refinements to the Neher-McGrath model for calculating the ampacity of underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 12-30.
- [10] 梁永春, 闫彩虹, 赵静, 等. 排管敷设电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1002-1007.
- LIANU Yongchun, YAN Caihong, ZHAO Jing, et al. Numerical calculation of transient temperature field and short term ampacity of group of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1002-1007.
- [11] HIRANANDANI A. Calculation of conductor temperatures and ampacities of cable systems using a generalized finite difference model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 15-24.
- [12] 周芸, 杨奖利. 基于分布式光纤温度传感器的高压电力电缆温度在线监测系统[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 74-76.
- ZHOU Yun, YANG Jiangli. Online temperature monitoring system for high voltage power cable based on distributed optical fiber temperature sensors[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 74-76.
- [13] GARRIDO C, OTERO A F, CIDRAS J. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 667-678.
- [14] IEC 60287:1993 Electric cables-calculation of the current rating[S]. 1993.
- [15] JB/T 10181—2014 电缆载流量计算[S]. 2014.
- JB/T 10181—2014 Calculation of the current rating of cables[S]. 2014.
- [16] 李超群, 沈培峰, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ANDERS G J. Institute of electrical and electronics engineers. Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment[M]. USA: Wiley, 2005.
- [20] MALMEDAL K, BATES C, CAIN D. On the use of the law of times in calculating soil thermal stability and underground cable ampacity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1215-1220.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [22] MAXIMOV S, VENEGAS V, GUARDADO J L, et al. Analysis of underground cable ampacity considering non-uniform soil temperature distributions[J]. Electric Power Systems Research, 2016(132): 22-29.
- 傅晨钊(1975—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输变电设备运行技术研究。
- 司文荣(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输变电设备运行技术研究。

(上接第 133 页)

- [18] NEWCOMBE DR, DINESH C, BAILEY C, et al. Reliability metrics for IGBT power modules[C]//11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. Xi'an: [s.n.], 2010: 670-674.
- [19] MEYSENC L, SALUDJIAN L, BRIEARD A. A high heat flux IGBT micro exchanger setup[J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 1997, 20(3): 334-341.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an University of Technology Press, 2006.
- 杨晓平(1978—), 男, 博士, 工程师, 主要从事柔性直流输电技术与电能质量技术研究。
- 雒雯霞(1985—), 女, 工程师, 主要从事电力电子器件热仿真。
- 骆妮(1987—), 女, 硕士, 主要从事柔性直流输电系统中的应用开发研究工作。