

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.026

土壤直埋电缆群暂态温升快速计算模型的研究

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 200437; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要:文中研究了一种基于时域响应和热传导场可叠加原理的方法,以实现对土壤直埋电缆群暂态温升的快速计算。首先将电缆群的共同作用离散为多根电缆单独作用的组合,单根电缆自身发热利用自响应模型描述,电缆间的相互影响利用互响应模型描述,然后通过节点温升耦合的方式获得电缆线芯的综合温升,从而实现暂态温升的快速计算。在算例验证中,利用通用软件Cymcap提取模型参数后,计算了典型工况的暂态温升过程,并与软件结果进行了比较,验证了方法的有效性。

关键词:土壤直埋; 电缆群; 暂态温升; 集总参数; 热传导

Research on the Fast Calculation Model for Transient Temperature Rise of Soil Directly Buried Cable Group

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

(1. State Grid Shanghai Electrical Power Research Institute, Shanghai 200437, China;

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

Abstract: A method based on the time domain response and superposition property of heat conduction is studied to realize the fast calculation of transient temperature rise of soil directly buried cable group. Transient temperature rise of cables could be simulated as the superposition of several single-core cables. The self-heating of single-core cable is described by using the self-excited response model. The interaction of different single-core cables is described by the dynamic response model. Besides, the integrated temperature rise of cable core is obtained by node coupling method. In the case study, model parameters are firstly extracted by Cymcap. Temperature rise under typical operating conditions is then obtained respectively by the lumped parameter model and commercial software. The comparative results verify the validity of the method proposed in this paper.

Key words: soil directly buried; cable system; transient temperature rise; lumped parameter; heat conduction

0 引言

上海电网拥有大量的电力电缆,其敷设方式主要有土壤直埋、排管、沟槽和隧道等4种方式。110 kV及以下的用电区域,特别是城区范围内,土壤直埋是主要的敷设方式。随着商用、居民等供电负荷的增加,夏季高峰与冬季高峰时存在短时的、超过额定值的负荷电流,可能影响到设备的安全运行。现有技术条件下,由于无法较为准确评估地埋电缆,特别是不同负荷电流组合下电缆群的实际暂态温升,运行部门一般倾向于通过更换大容量的电缆来

满足负荷需求,然而电缆新建与改造往往受到市政、开挖、运行方式等因素影响,工程实施困难重重,且设备资产运营的经济性不足。

由于电力电缆敷设在地下,其线芯实时暂态温升无法通过直接测量方式获得。截至目前获取线芯温度的方法主要包括经验公式法、数值计算法和间接测量法等方法。其中经验公式法主要用于计算稳态温升,在暂态温升计算中效用较低^[1-5]。数值计算法在求解实际多工况电缆温升时需要巨大计算量,计算时间较长,无法满足实时获取结果的要求^[6-12]。间接测量法首先通过加装光纤测温装置获取电缆表皮温度,进而推算线芯温度。该方法在应用过程中存在严重依赖测温装置的健康状况,测温偏差、

传输通讯等缺陷将直接制约电缆设备运行的选择。此外,应用过程中需要加装多套设备,降低了系统可靠性。为提高装置可靠性则需要采取增强冗余设计或多套并装的方法,这大大增加了运行维护的工作量和一次投资^[13-20]。可以发现,目前尚缺乏土壤直埋电缆群暂态温升快速计算的有效方法。因此,开展相关计算方法的研究具有很强的实用性和必要性^[21-24]。

基于时域响应特性和热传导场可叠加原理的方法,文中提出了“分散+组合”的电缆群暂态温升集总参数模型,通过建立电缆发热的自响应模型与互响应模型描述电缆发热与传热过程,通过节点温升耦合与损耗实时修正的方式来获得电缆线芯综合温升,从而实现暂态温升的快速计算。

1 电缆群暂态温升模型

1.1 暂态模型原理

电缆群的发热取决于电缆损耗与所处断面的热学特征,前者与运行电流、运行温度有明确的对应关系,并在实际工程得到广泛应用;后者主要取决于断面几何参数及各部分的物理参数,一般认为在运行温度范围内这些物理参数保持不变,以上为模型的建立提供了理论依据。根据传热学原理与基于温升的时域响应特性,文中采用“分散模型”求解各电缆自身及相互影响,在结果上(而不是统一的热路模型上)进行“组合”来反映整体的温升过程。

电缆群线芯暂态温度计算模型见图1(以两根单芯电缆为例)。其中左上为电缆1自响应模型;右上为“电缆2—电缆1”互响应模型;左下为“电缆1—电缆2”互响应模型;右下为电缆2自响应模型。根据对偶的原理,除发热量外,两个互响应模型的具体参数值相同。

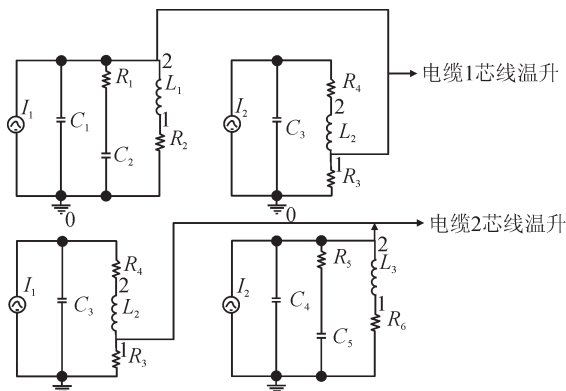


图1 两根单芯电缆集总参数暂态热路模型

Fig. 1 Transient thermal circuit model with lumped parameter for two single-core cables

图1左上自响应模型中, I_1 为电缆1损耗(发热量); C_1 为电缆1自身等效热容; L_1 为电缆1土壤断面

等效热容; R_1 为电缆1土壤断面等效热容的平衡热阻; R_2 为电缆1线芯对环境的等效热阻; L_1 为电缆1断面等效热阻的平衡热感;右下模型参数含义亦同。

图1右上互响应模型中, I_2 为电缆损耗(发热量); R_3 为“电缆2—电缆1”线芯间对环境的综合热阻; R_4 、 L_2 与 C_3 无明确的物理意义,是用于产生不同的过渡过程。左下模型参数含义亦同。

1.2 暂态模型建立与应用步骤

暂态模型建立与应用步骤见图2,其中单线箭头部分是分散求解,建立自响应模型与互响应模型;双线箭头部分是组合应用,求取线芯温度。

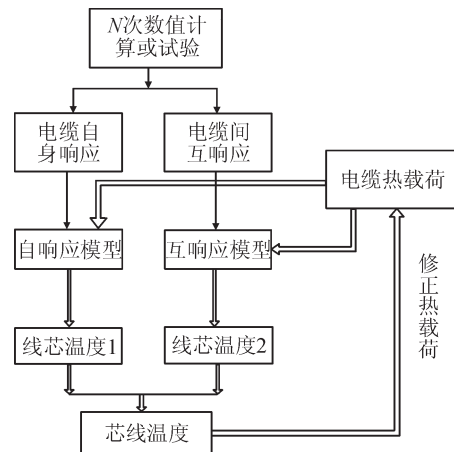


图2 模型参数提取与应用步骤

Fig. 2 Process of parameter extraction and application

主要步骤包括:

- 1)通过数值计算或试验,对 N 根电缆分别单独施加热载荷,求取响应过程。
- 2)根据单根热学模型与 N 根电缆自身温升过程,建立各电缆自响应的集总参数模型。
- 3)根据 N 根电缆互影响温升过程,借鉴“降阶”思路,建立互响应的集总参数模型。
- 4)待解电缆热载荷,分别输入自响应模型与互响应模型,得到线芯温升1与线芯温升2,两者相加得到线芯温升。
- 5)根据线芯温度实时修正热载荷,重复4)过程,得到新的线芯温度。
- 6)重复步骤5),如此循环直至计算结束,即可获得整个线芯的暂态温升。

该模型的温度参考点为环境温度,且计算不依赖于表皮测温。由于此模型的确定不依赖于电缆本身发热量或电流大小,只与电缆本体、敷设条件及周围材料的热特性相关。因此,模型建立后,变换电缆电流时就无需重复复杂的数值计算,可直接通过简单热路计算和损耗修正获得满意结果。

2 模型建立与验证

2.1 模型的建立

模型的建立过程实质上是利用集总参数来模拟或提取传热过程的规律。图1所示模型的参数提取过程需要参考数值计算或试验结果。文中模型建立与验证的数据基础均来源于电缆温升通用计算软件Cymcap。

2.1.1 计算模型

电缆群计算模型见图3,包括4根单芯电缆与一回三芯电缆,电缆的结构参数见图4,敷设参数见表1。环境温度为20℃,土壤热阻系数为1.0 m²K/W,单芯电缆额定电流选为1 000 A,三芯电缆额定电流选为1 500 A。

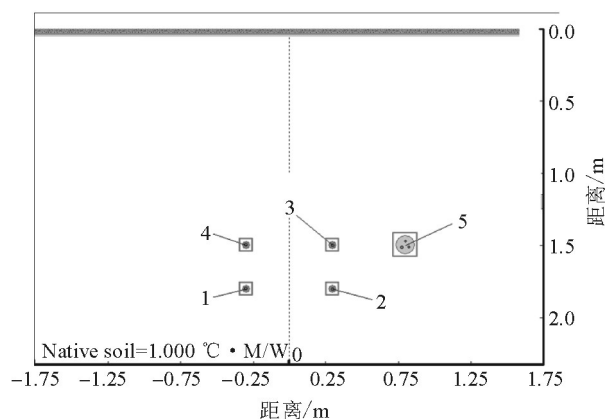


图3 计算模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of calculation model

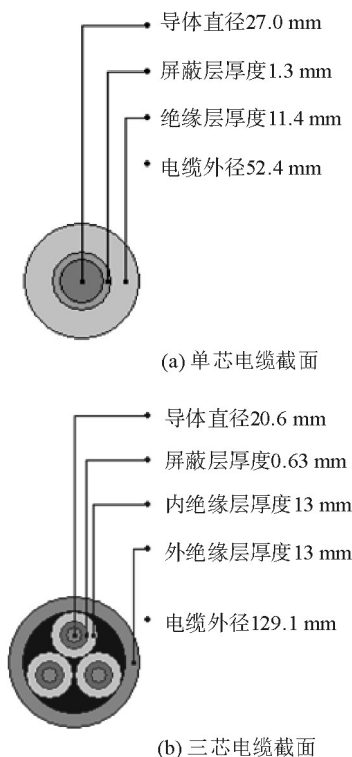


图4 电缆截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cable cross-section

表1 电缆敷设的中心位置

Table 1 Laying central location of cables

电缆编号	中心位置座标/m
电缆1	(-0.3,1.85)
电缆2	(0,1.85)
电缆3	(-0.3,2.1)
电缆4	(0,2.1)
电缆5	(0.3,2.0)

需要指出的是,由于模型重点关注断面的热学特性,为便捷起见,模型建立过程中设定线芯电阻率温度系数为 $1 \times 10^{-12} \text{ K}^{-1}$,以保证热流为恒定,即暂不考虑电缆交流电阻的温度影响。实际应用中,根据初始 t 时刻的电缆温度与电流值,可得到此时刻的热流(损耗)。将该热流(损耗)输入模型,就能算得 $t+\Delta t$ 时刻的电缆温升。按此时刻的线芯温度进行折算修正后得到新的热流(损耗),再将其输入模型,即可得到 $t+2\Delta t$ 时刻的温升数值。如此循环直至计算结束,即可获得整个线芯的暂态温升。

2.1.2 计算工况与结果

稳态工况为各电缆依次施加额定电流,其余电缆电流为0,得到各电缆的稳态温升,见表2。

表2 各工况电缆稳态温升计算结果

Table 2 Computed results of steady temperature rise of cables with different working conditions

载流 电缆	损耗/W	电缆1 温升/K	电缆2 温升/K	电缆3 温升/K	电缆4 温升/K	电缆5 温升/K
1	36.95	32.5	9.6	8.5	13.5	6.5
2	36.95	9.6	32.5	13.5	8.5	10.3
3	36.95	8.5	13.5	32.5	9.6	10.6
4	36.95	13.5	8.5	9.6	32.5	6.3
5	55.35	9.7	15.4	15.8	9.4	57.2

暂态工况为各电缆依次施加额定电流,波形为阶跃波,其余电缆电流为0,得到各电缆的暂态温升过程,计算时长为64 h,步长0.1 h。电缆2施加额定电流时,各电缆线芯的暂态温升过程见图5。值得注意,从传热学角度来看,三芯电缆的发热问题与单芯电缆基本一致,因此Cymcap中仅给出了三相中平均线温,文中所建模型中也将三芯电缆视为单芯进行处理。

2.1.3 集总模型参数的提取

图1所示模型中各参数的求解分别采用解析法与遗传算法来实现。以电缆2自响应模型与“电缆2—电缆1”互响应模型为例进行说明。

1) 电缆2自响应模型。① 电缆2线芯对环境的等效热阻 R_6 。根据图1所示模型可知,稳态温升时,

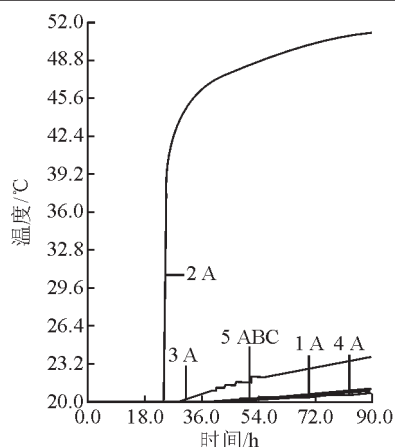


图5 电缆2载流条件下各电缆线芯暂态温升过程

Fig. 5 Temperature rise of cable cores for cable 2

电缆2自身等效热容、断面等效热容、断面等效热阻的平衡热感均已平衡,因此可得 $R_6=32.5 \text{ K}/36.95 \text{ W/m}=0.879 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。②电缆自身等效热容 C_4 、断面等效热容 C_5 、断面等效热容的平衡热阻 R_5 、断面等效热阻的平衡热感 L_3 。

以上参数反映了断面热传递的过渡过程,可采用遗传算法求取,过程如下。其中,根据热学特性,可令 $R_5 C_5 = L_3 / R_6$ 。

设置参数范围:根据试算经验,取 $C_4 \in (1, 50)$, $C_5 \in (10, 500)$, $R_5 \in (0.01, 5)$,二进制编码,初始种群数量为100,最大遗传代数为500,交叉概率0.75,变异概率0.2。

设置适应度函数:选取图1所示模型暂态温升响应 $m(i)$ 与图5所示计算暂态温升 $fem(i)$ 两条曲线的偏差之和作为适应度函数,取

$$fitness = \sum_{i=1}^{240} [m(i) - fem(i)]^2 \quad (1)$$

设置收敛判据:考虑热响应的吻合性,取(0-24)×0.1 h时间段内各离散点平均偏差不大于0.2 K,则适应度函数值应小于 $240 \times 0.2 \times 0.2 = 9.6$ 。如遗传代数达到最大遗传代数,而不能满足适应度函数值小于9.6,则认为计算失败。

遗传算法的进化过程见图6。计算结果为: $C_1=7.80 \text{ W} \cdot \text{s}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $C_2=317.37 \text{ W} \cdot \text{s}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $R_2=0.58 \text{ K} \cdot \text{m/W}$, $L_1=161.80 \text{ K} \cdot \text{s} \cdot \text{m/W}$ (以下文、表中 R 、 C 、 L 参数的单位均与上述一致)。电缆2暂态温升自响应模型计算结果与通用软件Cymcap计算结果的比较见图7。

2)“电缆2—电缆1”互响应模型。①“电缆2—电缆1”线芯对环境的等效热阻 R_3 。根据图1所示模型可知,稳态温升时,“电缆1—电缆2”传热的过渡过程已结束,因此可得 $R_3=9.6 \text{ K}/36.95 \text{ W/m}=0.260 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。②过渡参数 C_3 、 R_4 与 L_2 。

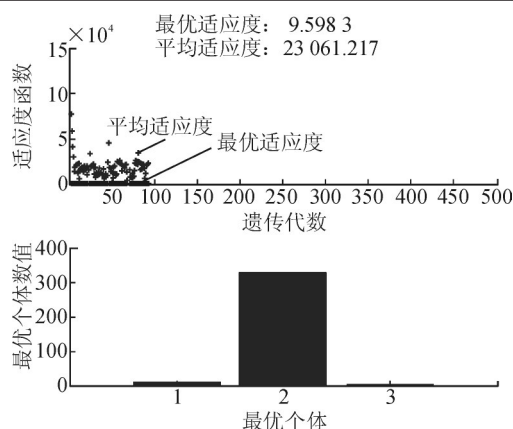


图6 自响应模型参数提取遗传算法进化过程

Fig. 6 Process of parameter extraction for self-excited response model

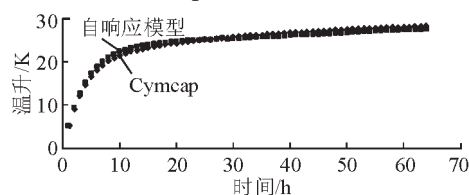


图7 电缆2暂态温升自响应计算结果比较

Fig. 7 Comparison of transient temperature rise of cable 2 by different method

以上参数反映了断面热传递的过渡过程,可采用遗传算法求取,过程如下。

设置参数范围:根据试算经验,取 $C_3 \in (100, 2500)$, $R_4 \in (0.01, 10)$, $L_2 \in (100, 2500)$,二进制编码,初始种群数量为100,最大遗传代数为500,交叉概率为0.75,变异概率为0.2。

设置适应度函数:选取图1所示模型暂态温升响应 $m(i)$ 与图5所示计算暂态温升 $fem(i)$ 两条曲线的偏差之和作为适应度函数,取

$$fitness = \sum_{i=1}^{240} [m(i) - fem(i)]^2 \quad (2)$$

设置收敛判据:考虑热响应的吻合性,取(0-24)×0.1 h时间段内各离散点平均偏差不大于0.05 K,则适应度函数值应小于 $240 \times 0.05 \times 0.05 = 0.6$ 。如遗传代数达到最大遗传代数,而不能满足适应度函数值小于0.6,则认为计算失败。

遗传算法的进化过程见图8。计算结果为: $C_3=987 \text{ W} \cdot \text{s}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $R_4=2.07 \text{ K} \cdot \text{m/W}$, $L_2=1594.82 \text{ K} \cdot \text{s} \cdot \text{m/W}$ 。图9为“电缆2—电缆1”暂态温升互响应模型计算结果与通用软件Cymcap计算结果的比较。

3)参数汇总。重复以上过程,可得到图3所示电缆群的整体模型,见图10,具体参数见表3。

2.2 模型的验证

为验证模型的有效性,选取典型工况,利用通

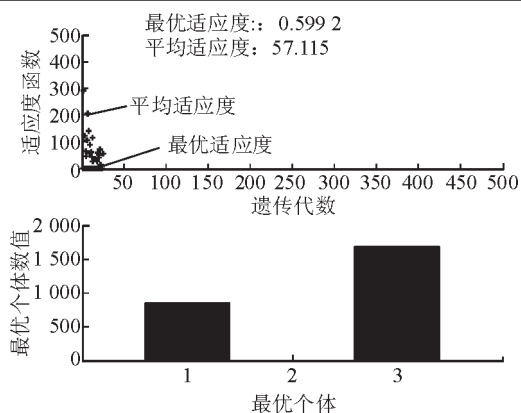


图8 互响应模型参数提取遗传算法进化过程

Fig. 8 Process of parameter extraction for dynamic response model

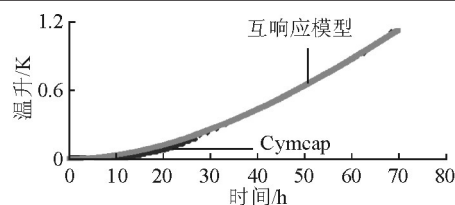


图9 “电缆2—电缆1”暂态温升互响应计算结果比较

Fig. 9 Comparison of transient temperature rise of cable 1 to cable 2 by different method

用软件 Cymcap 进行了计算,结果见图 11,并与集总参数模型计算结果相比较,见图 12-16,误差统计结果见表 4。工况设置见表 5,均为阶跃负载。该例中已考虑了温度对损耗的影响。

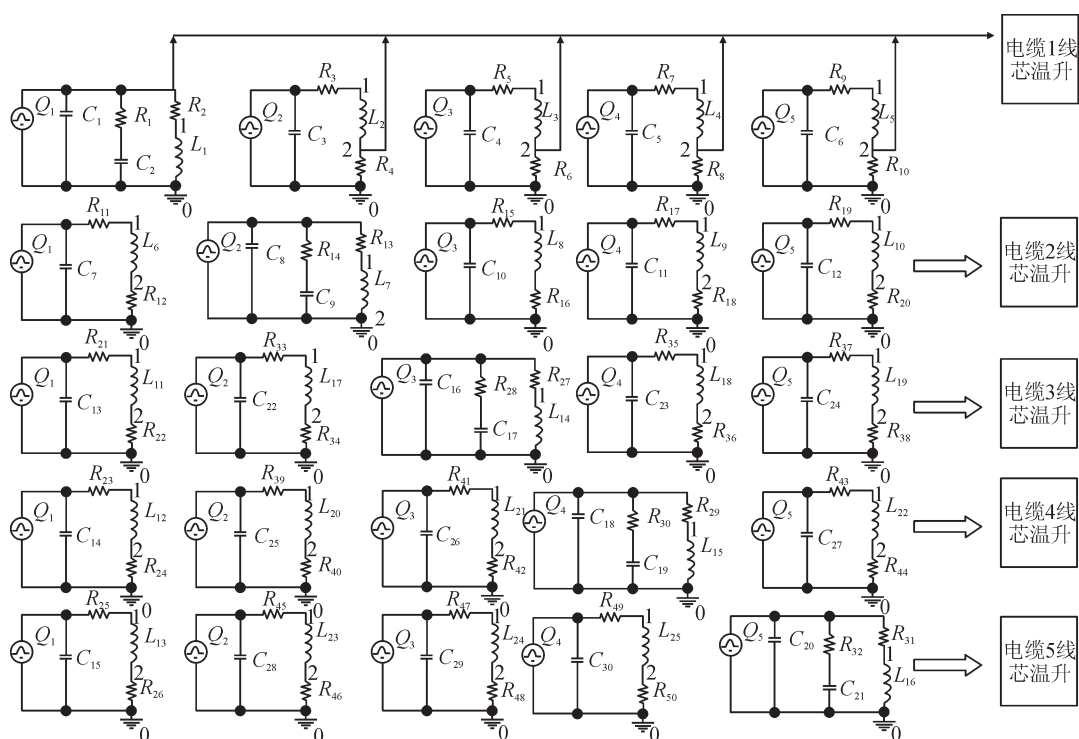


图10 电缆群线芯暂态温升“分散+组合”集总参数模型

Fig. 10 Lumped-parameter model of the transient temperature rise at the core of the cable group

图 11-15 的比较表明,计算过程中,集总参数模型计算结果与 Cymcap 计算结果基本吻合。表 4 中统计结果表明,集总参数模型结果与 Cymcap 计算最大偏差仅为 1.43 K,可满足实际运行的要求。由此可知,“分散+组合”集总参数模型可以很好地模拟电缆群暂态温升过程,特别是能够将电缆间的影响较为准确地评估,这将为实际运行中负荷的调整与分配提供直接依据。

由于 Cymcap 软件边界条件设置限制,文中未对环境温度变化对电缆暂态温升的影响进行建模分析。实际中,可参考文中方法,通过数值计算软件获得环境变化对电缆线芯温升的时域响应影响,利

用遗传算法求取相关参数,建立“环境—电缆”的互响应模型,从而构成完整的地理电缆群暂态温升“分散+组合”集总参数模型。

3 结论

文中主要围绕土壤直埋电缆群暂态温升快速计算模型展开研究,主要得到以下结论:

1) 基于热传导场可叠加原理,文中将电缆群的共同作用离散为多根电缆单独作用的组合,单根电缆自身发热利用自响应模型描述,电缆间的相互影响利用互响应模型描述,然后通过节点温升耦合的方式来获得电缆线芯的综合温升,从而实现暂态温

表 3 电缆群线芯暂态温升“分散+组合”集总参数模型

Table 3 Lumped parameters of the model of transient temperature rise at the core of the cable group

分散模型		参数			
1-1	$C_0=7.80$	$C_1=317.370$	$R_1=0.580$	$R_2=0.879$	$L_1=161.80$
1-2	$C_7=987.00$	$R_{11}=2.071$	$L_6=1\,594.000$	$R_{12}=0.260$	—
1-3	$C_{13}=1\,728.00$	$R_{21}=0.099$	$L_{11}=1\,375.000$	$R_{22}=0.231$	—
1-4	$C_{14}=713.00$	$R_{23}=2.427$	$L_{12}=38.698$	$R_{24}=0.367$	—
1-5	$C_{15}=4\,452.00$	$R_{25}=1.026$	$L_{13}=8\,295.000$	$R_{26}=0.177$	—
2-2	$C_8=7.80$	$C_9=317.370$	$R_{14}=0.580$	$R_{13}=0.879$	$L_7=161.80$
2-3	$C_{22}=713.00$	$R_{33}=2.427$	$L_{17}=38.698$	$R_{34}=0.367$	—
2-4	$C_{25}=1\,728.00$	$R_{39}=0.099$	$L_{20}=1\,375.000$	$R_{22}=0.231$	—
2-5	$C_{28}=1\,340.00$	$R_{45}=0.866$	$L_{23}=1\,541.000$	$R_{46}=0.278$	—
3-3	$C_{16}=7.80$	$C_{17}=317.370$	$R_{28}=0.580$	$R_{27}=0.879$	$L_{14}=161.80$
3-4	$C_{26}=987.00$	$R_{41}=2.071$	$L_{21}=1\,594.000$	$R_{42}=0.260$	—
3-5	$C_{29}=600.00$	$R_{47}=2.756$	$L_{24}=2\,004.000$	$R_{48}=0.287$	—
4-4	$C_{18}=7.80$	$C_{19}=317.370$	$R_{30}=0.580$	$R_{29}=0.879$	$L_{15}=161.80$
4-5	$C_{30}=3\,658.00$	$R_{49}=1.020$	$L_{25}=8\,275.000$	$R_{50}=0.179$	—
5-5	$C_{20}=23.86$	$C_{21}=626.728$	$R_{32}=0.465$	$R_{31}=0.677$	$L_{16}=197.30$

注: 由于电缆间传热的对称性, 该表仅列出部分参数, 其余参数可由对称性推出; 参数单位同文中参数相同。

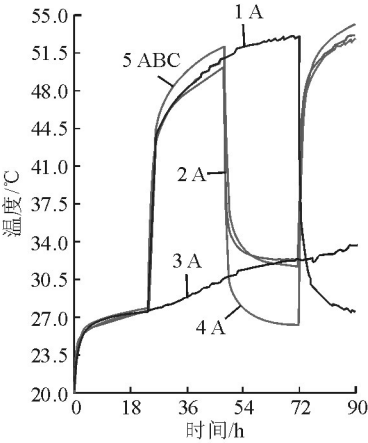
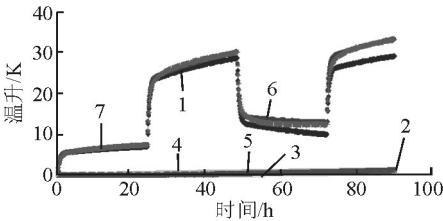


图 11 Cymcap 计算结果

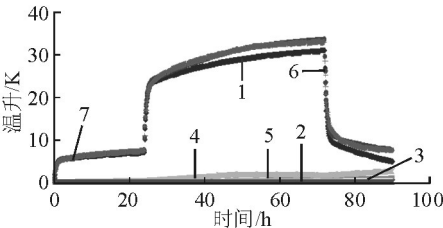
Fig. 11 Computed result by Cymcap



1—电缆2自身; 2—电缆1—电缆2; 3—电缆3—电缆2;
4—电缆4—电缆2; 5—电缆5—电缆2; 6—综合温升;
7—Cymcap。

图 13 电缆 2 暂态温升计算结果比较

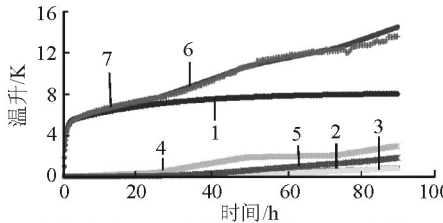
Fig. 13 Comparison of transient temperature rise of cable 2 by different method



1—电缆1自身; 2—电缆2—电缆1; 3—电缆3—电缆1;
4—电缆4—电缆1; 5—电缆5—电缆1; 6—综合温升;
7—Cymcap。

图 12 电缆 1 暂态温升计算结果比较

Fig. 12 Comparison of transient temperature rise of cable 1 by different method



1—电缆3自身; 2—电缆1—电缆3; 3—电缆2—电缆3;
4—电缆4—电缆3; 5—电缆5—电缆3; 6—综合温升;
7—Cymcap。

图 14 电缆 3 暂态温升计算结果比较

Fig. 14 Comparison of transient temperature rise of cable 3 by different method

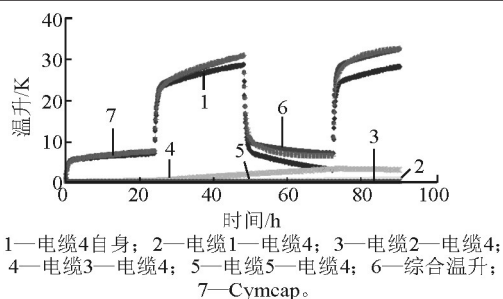


图15 电缆4暂态温升计算结果比较

Fig. 15 Comparison of transient temperature rise of cable 4 by different method

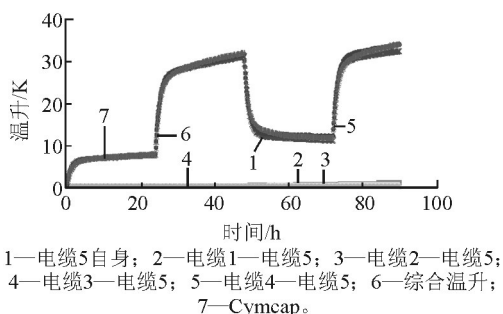


图16 电缆5暂态温升计算结果比较

Fig. 16 Comparison of transient temperature rise of cable 5 by different method

表4 计算误差比较

Table 4 Comparison of calculation results		K			
电缆	误差	(0 ~ 24) h	(24 ~ 48) h	(48 ~ 72) h	(72 ~ 96) h
电缆1	最大	0.21	0.64	0.67	1.43
	最小	0.00	0.01	0.00	0.01
	平均	0.13	0.35	0.21	0.38
电缆2	最大	0.21	0.62	0.96	1.24
	最小	0.00	0.00	0.01	0.00
	平均	0.12	0.36	0.70	0.27
电缆3	最大	0.21	0.20	0.37	0.92
	最小	0.00	0.00	0.00	0.14
	平均	0.13	0.10	0.16	0.56
电缆4	最大	0.21	0.64	1.11	1.39
	最小	0.00	0.01	0.01	0.01
	平均	0.13	0.35	0.78	0.62
电缆5	最大	0.49	0.99	1.10	1.03
	最小	0.00	0.00	0.00	0.00
	平均	0.15	0.35	0.38	0.37

表5 计算工况

Table 5 Computation conditions		A			
电缆		(0 ~ 24) h	(24 ~ 48) h	(48 ~ 72) h	(72 ~ 96) h
电缆1		500	1 000	1 000	0
电缆2		500	1 000	500	1 000
电缆3		500	500	500	500
电缆4		500	1 000	0	1 000
电缆5		500	1 000	500	1 000

升的快速计算;

2)基于时域响应特性,文中首次提出了电缆间暂态温升影响的互响应模型,与通行的有限元方法比较,该模型具备可靠的准确度与精炼的结构;

3)试算案例及与Cymcap计算比较表明,文中首次提出的“分散+组合”的地理电缆群暂态温升算法是合理有效的,实现简便,计算效率高,可用于实时、便捷的快速计算,从而支持运行的实时需要。

参考文献:

- [1] Calculation of the current rating-current rating equations (100% load factor)and calculation of losses:IEC 60287-1[S]. 2001.
- [2] Calculation of the current rating-thermal resistance: IEC 60287-2[S]. 2001.
- [3] Calculation of the current rating-sections on operating conditions:IEC 60287-3[S]. 1999.
- [4] 电缆载流量计算:JB/T 10181—2014[S]. 2014.
Calculation of the current rating of cables: JB/T 10181—2014[S]. 2014.
- [5] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
MA Guodong. Electric wire and cable capacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 University Press, 2012.
- [9] 黄雄峰,徐彬昭,张宇娇,等. 基于参数拟合技术直埋电缆的缆芯暂态温度计算[J]. 中国电力, 2016, 49(10): 60-66.
HUANG Xiongfeng, XU Binzhao, ZHANG Yujiao, et al. Transient temperature calculation of buried cable core based on parameter fitting of thermal circuit[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 60-66.
- [10] 段佳冰,尹成群. 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. 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, 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.
- LIANG 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.
- [12] 梁永春, 李彦明. 地下电缆群温度场和载流量计算新算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 185-190.
- LIANG Yongchun, LI Yanming. A new method to calculate the steady-state temperature field and ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 185-190.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 雷 鸣, 刘 刚, 赖育庭, 等. 采用Laplace方法的单芯电缆线芯温度动态计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1150-1154.
- LEI Ming, LIU Gang, LAI Yuting, et al. Dynamic calculation of core temperature of single core cables using Laplace method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1150-1154.
- [16] 雷成华, 刘 刚. BP神经网络模型用于单芯电缆导体温度的动态计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 184-189.
- LEI Chenghua, LIU Gang. Dynamic calculation of conductor temperature of single-core cable using BP neural network[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 184-189.
- [17] 刘 刚, 雷成华. 根据电缆表面温度推算导体温度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 212-217.
- LIU Gang, LEI Chenghua. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 212-217.
- [18] 雷 鸣. 依据电缆表皮温度准确计算单芯高压电缆线芯温度的理论及实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- LEI Ming. Theoretical and experimental study on accurate calculation of single-core high-voltage cable core temperature based on skin temperature[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 刘 刚, 雷成华. 提高单芯电缆短时负载流量的试验分析[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.
- [22] DIAZAGUILÓ 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.
- [23] 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.
- [24] 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。