

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.002

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

刘 畅¹, 徐 政¹, 宣耀伟², 张 健²

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 文中提出一种直流电缆的两层简化结构, 以减少应用有限元方法计算直流电缆稳态载流量的计算量, 增强其计算效率。将直流电缆结构等效为两层: 将除线芯外的各层等效为一层, 与线芯构成两层简化结构。等效层的等效导热系数由除线芯外其余各层的导热系数的调和平均数算得。在算例验证中, 针对 DC 200 kV YJQ41 1×1000+2×12 型号直流电缆, 分别用有限元方法计算了该电缆原始结构和两层简化结构不同敷设条件下的给定电流时的线芯温度, 并与厂商给出的该型号电缆的技术数据参照对比, 证明了应用等效导热系数简化电缆结构以进行有限元求解的结果是准确的。之后文中比较了上述计算过程中两种结构下有限元方法的计算量, 比较结果表明, 两层简化结构的计算量较原始结构的计算量有显著的减少。

关键词: 直流电缆; 载流量; 有限元; 等效导热系数

Simplified Finite Element Method for Calculating DC Cable's Current Capacity Using Equivalent Thermal Conductivity

LIU Chang¹, XU Zheng¹, XUAN Yaowei², ZHANG Jian²

(1. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhejiang Zhoushan 316000, China)

Abstract: In order to simplify the calculation of DC cable's current capacity using the finite element method(FEM), an equivalent two-layer structure of DC cable is presented to replace the ordinary structure and the equivalent thermal conductivity of the equivalent two-layer structure's each layer is calculated to make sure that the equivalent structure could simulate the ordinary structure precisely. Based on the equivalent two-layer structure, the number of triangle elements of the finite element mesh could be decreased remarkably comparing with the number of elements of the ordinary structure's finite element mesh. In the case study, the ordinary structure and the equivalent two-layer structure are applied respectively to calculate the current capacity of a specific DC cable(DC 200 kV YJQ41 1×1000+2×12 cable)with FEM. The results show that the two structures coincide with each other and they are consistent with the rated capacity given by the manufacture. Besides, a comparison between the computational demands of the two structures is performed. The result shows that the equivalent two-layer structure could dramatically simplify the calculation.

Key words: DC cable; current capacity; finite element method; equivalent thermal conductivity

0 引言

随着城市化进程的加速和海洋输电的兴起, 以及对环境保护的日益重视, 地下电缆输电和海底电缆输电得到了很大的发展^[1]。直流电缆在柔性直流

输电系统中经常用于连接两端或多端换流站, 在城市直流配电系统以及跨海输电工程中也发挥着重要作用^[2-5]。直流电缆的载流量作为重要的运行参数, 其计算的准确性对于直流电缆的设计以及整个直流输电工程的规划和运行具有重要的意义^[6-8]。

目前电缆载流量的计算方法主要有: 以 IEC 60287 标准为代表的解析法^[9], 以有限差分^[10]、有

收稿日期: 2015-11-26; 修回日期: 2015-12-29

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2012AA051704)。

Project Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2012AA051704).

限体积^[11]、有限元^[12-16]等方法为代表的数值计算方法。有限元方法计算电力电缆载流量因其更高的准确性以及对于电缆各种敷设条件和运行工况的更好的适应性而得到了非常广泛的关注^[17-19],但该方法的复杂程度和计算的时间成本远远高于以IEC 60287 标准为代表的等效热阻法,使得其在工程中的应用尚不如等效热阻法广泛。如果能够在不影响电力电缆载流量计算精度的前提下,对有限元方法计算电力电缆载流量的过程进行有效简化,则有限元方法将在电缆工程中具有较强的推广价值。

1 计算直流电缆载流量的有限元模型及简化思路

直流电缆具有复杂的结构,在应用有限元方法计算直流电缆的载流量时也需要建立相对复杂的计算模型,如果能够对电缆的结构进行简化,则计算模型也会相对简单,计算的效率会相应的提高。

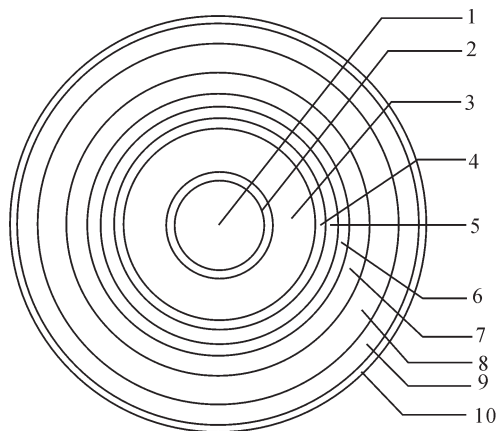
1.1 直流电缆的结构

由于直流电缆经常需要工作在高电压大容量的传输线路中,因此直流电缆一般拥有较为复杂的结构。以海底敷设的直流电缆为例,其一般结构从电缆中心向外依次为:线芯导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、半导体阻水层、铅套、PE 护套、内衬层、铠装以及外护套,见图 1。并且电缆每层所用材料不同,致使每层拥有不同的导热系数,因此在应用有限元方法计算直流电缆的载流量时会产生非常大的计算量:应用有限元方法对直流电缆建模时首先需要将直流电缆的横截面进行有限元网络剖分,由于直流电缆相邻两层的导热系数不同,因此在相邻两层的分界处需要将网络剖分的非常细密,并且直流电缆的结构包含很多层,因此整个直流电缆横截面剖分出的有限单元(一般为三角单元)数量是巨大的,因此在后续的计算中有限元方程矩阵的规模也是巨大的,因而需要相当大的计算量才能完成求解。

如果能将上述电缆的结构简化,减少电缆结构的层数,则在有限元网络剖分时生成的有限单元的数量就会减少,从而降低有限元方程求解的运算量。而要减少电缆的层数,就需要将相邻的两层甚至多层用一个等效层来替代,并且确定这个等效层的等效导热系数。

1.2 求解电缆温度场的控制方程

应用有限元法计算直流电缆载流量可以通过



1—电缆导体; 2—导体屏蔽层; 3—绝缘层;
4—绝缘屏蔽层; 5—半导体阻水层; 6—铅套; 7—PE护套;
8—内衬层; 9—铠装; 10—外护套。

图1 一种海底直流电缆的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a submarine DC cable

对直流电缆的温度场进行迭代求解,即在给定直流电缆的线芯最高工作温度后,手动设置线芯电流的初值并求解此电流值下的温度场,若求出的温度场中线芯温度与给定的线芯允许最高温度不相等,则修改电流值并重新计算线芯温度,直至找到合适的电流值,此电流值为载流量。在每一次迭代中,都需要应用有限元方法求解温度场。

求解电缆温度场的控制方程差分形式见式(1)^[20-21]。

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: k 是导热系数; T 是温度; q 是内热源; ρ 是材料的密度; c 是材料的比热容; t 是时间。

计算电缆温度场的求解域一般为电缆的横截面,即半无限大二维场域,且在稳态条件下进行求解,则式(1)可以简化为

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q = 0 \quad (2)$$

式(2)中: k 是导热系数; T 是温度; q 是内热源; x, y 为坐标。

1.3 边界条件

在温度场求解中所有边界条件都可以归纳为3类。

1)第1类边界条件(Dirichlet 边界条件)。第1类边界条件指边界上温度函数已知,见式(3)。

$$T|_r = f(x, y) \quad (3)$$

式(3)中: T 是温度; $f(x, y)$ 是边界 Γ 上的温度函数。

2)第2类边界条件(Neumann 边界条件)。第2类边界条件指边界上的热流密度已知,见式(4)。

$$k \frac{\partial T}{\partial n} |_r = -g(x, y) \quad (4)$$

式(4)中: k 是导热系数; T 是温度; $g(x, y)$ 是边界

Γ 上的热流密度函数, 其方向与边界的外法线向量 $\mathbf{n}$ 的方向一致。

3)第3类边界条件(对流边界条件)。第3类边界条件指与边界相接触的流体介质的温度 T_f 和换热系数 α 为已知, 见式(5)。

$$k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \big|_{\Gamma} = -\alpha(T - T_f) \big|_{\Gamma} \quad (5)$$

式(5)中: k 是导热系数; T 是温度; $\mathbf{n}$ 是边界 Γ 的外法线向量; α 是换热系数; T_f 是与边界 Γ 相接触的流体介质的温度。

1.4 有限元求解电缆载流量步骤

有限元求解电缆载流量一般包括以下步骤:

1)建立电缆模型。

2)确定边界和边界条件。

3)设定电缆中电流的初值, 应用有限元方法求解当前电流值下的温度场分布, 从而得到线芯温度。

4)若步骤3)中求得的电缆线芯温度与电缆最高允许工作温度一致, 则步骤3)中设定的电流值即为电缆的载流量, 若步骤3)中求得的电缆线芯温度与电缆最高允许工作温度不一致, 则修改步骤3)中的电流初值并重复该步骤, 直至迭代求出合适的电流值, 即为电缆的载流量。该过程见图2。

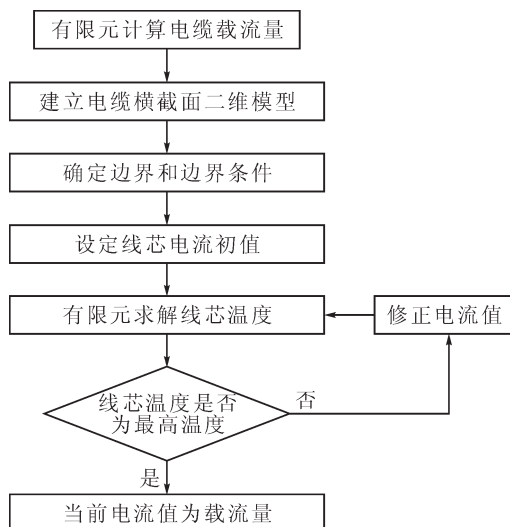


图2 有限元求解电缆载流量过程示意图

Fig. 2 Procedure of calculating current capacity of cable using FEM

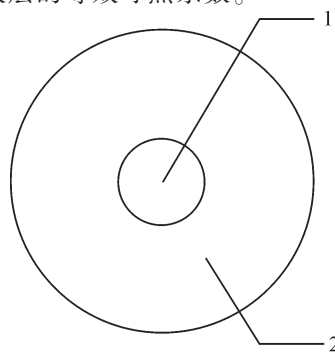
1.5 有限元模型的简化思想

上述步骤中, 步骤3)应用有限元方法求解电缆温度场需要很大的计算量, 而步骤4)的迭代求解又会使计算量成倍增长。因此, 若能在保证结果准确的前提下简化步骤3)中的有限元算法, 则步骤4)中每次迭代的计算量都会减少, 从而整个计算过程会得到很大的简化。

2 直流电缆的两层简化结构

2.1 简化结构模型

直流电缆在工作状态下, 热源只存在于电缆线芯中, 即工作电流通过电缆导体产生的焦耳热。因此直流电缆的结构可以简化为两层结构, 即含有热源的线芯导体为内层, 其他不含热源各层等效为外层, 见图3。为了使等效层能够反映被等效各层的总体导热性能, 需要根据原始结构中各层的导热系数计算等效层的等效导热系数。



1—电缆线芯; 2—等效层。

图3 直流电缆简化结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simplified structure of DC cable

2.2 等效导热系数

电缆的结构表明其各层结构属于串联关系, 而多种热的不良导体串联时其叠合后的合导热系数满足式(6)的关系

$$\frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}{k_i} \quad (6)$$

式(6)中: k_i 是第 i 种材料的导热系数; d_i 是第 i 种材料的厚度; n 为材料种类的数量; k 为 n 种材料叠合后的等效导热系数。

将上述等效导热系数应用于直流电缆, 将直流电缆除线芯导体外的其余各层等效为一层, 从而得到由线芯导体和等效层构成的两层简化结构。

3 两层简化结构准确性的验证

由图2可以看出, 有限元方法求解电缆载流量的核心步骤为应用有限元方法求解当前迭代电流值下的电缆线芯温度, 线芯温度求解的准确与否直接决定了载流量计算的准确性, 因此为了验证前述等效导热系数以及直流电缆两层简化结构的正确性, 需要计算给定工作电流下两层简化结构的线芯温度, 并将结果与有限元方法计算直流电缆原始结构线芯温度的计算结果对比。

3.1 验证算例所使用参数

文中计算所用的是型号为 DC 200 kV-YJQ41 的电缆,该电缆结构及材料参数见表 1。

表 1 DC 200 kV-YJQ41 电缆结构及材料参数

Table 1 Structure data and material data of DC 200 kV-YJQ41 cable

电缆结构	直径/mm	导热系数/[W·(mm·K) ⁻¹]
线芯导体	38.0	0.400 000
导体屏蔽层	41.4	0.163 000
绝缘层	73.4	0.000 285
绝缘屏蔽层	75.8	0.163 000
半导体阻水层	78.3	0.163 000
铅套	85.2	0.035 300
聚乙烯(PE)护套	91.5	0.000 285
内衬层	108.0	0.000 285
铠装	121.0	0.044 500
外护套	128.8	0.000 167
土壤	—	0.000 667

根据该型号电缆生产商给出的技术数据,该电缆在陆地直埋敷设条件下以 IEC 60287 标准计算的载流量为 1 094 A,线芯最高温度为 70 ℃。该电缆电阻及载流量参数见表 2。

表 2 DC 200 kV-YJQ41 电缆电阻及载流量参数

Table 2 Resistivity data and current capacity data of DC 200 kV-YJQ41 cable

项目	参数
线芯 20 ℃直流电阻/(Ω·mm ⁻¹)	1.76×10 ⁻⁸
线芯温度系数	0.003 93
最高工作温度/℃	70
陆地直埋载流量/A	1 094

3.2 有限元计算两种结构线芯温度

用有限元方法分别计算 DC 200 kV-YJQ41 型号电缆的原始结构和简化结构在线芯电流为 1 094 A 时的电缆线芯温度,并与生产厂家的技术数据对照。

电缆敷设条件见表 3。

表 3 敷设条件

Table 3 Burying conditions

敷设位置及方式	电缆埋深/m	电缆间距/m	土壤温度/℃	地表空气温度/℃	对流系数
陆地直埋	0.7	0.5	30.0	40.0	6.5

3.2.1 有限元方法计算原始结构线芯温度

建立电缆有限元计算模型,模型示意图见图 4。两根电缆轴心间的距离为敷设间距,其值为 0.5 m,电缆上顶点距离土壤上边界的距离为埋深,其值为 0.7 m,左侧电缆轴心与土壤左边界距离为 1 m,右侧电缆轴心距离土壤右边界距离为 1 m,两根电缆

的轴心距离土壤下边界均为 1 m。

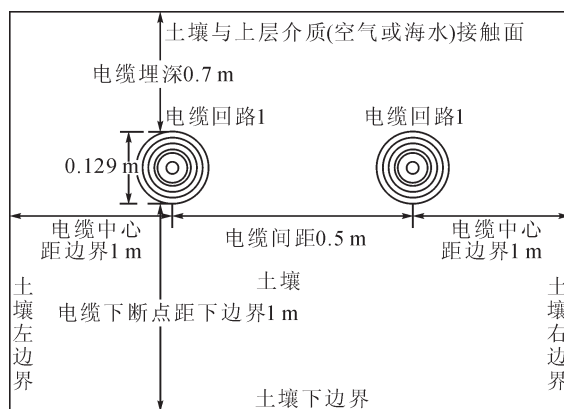


图 4 电缆原始结构计算模型示意图

Fig. 4 Calculation model of the original cable structure

确定电缆模型中的边界条件:土壤下边界模拟深层土壤,由于深层土壤为恒定温度,因此模型中土壤下边界为第 1 类边界条件;土壤左右边界为热绝缘,因此为第 2 类边界条件;土壤上边界为地表,与空气有对流换热,因此为第 3 类边界条件。各边界条件见表 4。

表 4 电缆模型中各土壤边界的边界条件

Table 4 Boundary conditions of each soil boundary in the calculation model

土壤边界	边界条件	公式描述
下边界	第 1 类	$T _r=30$
左边界	第 2 类	$k(\partial T/\partial n) _r=0$
右边界	第 2 类	$k(\partial T/\partial n) _r=0$
上边界	第 3 类	$k(\partial T/\partial n) _r=-6.5 \times (30-40)$

电缆模型与边界条件确定后,应用有限元方法计算 DC 200 kV-YJQ41 型号电缆线芯电流为 1 094 A 时的温度场分布,得到的温度分布图见图 5。

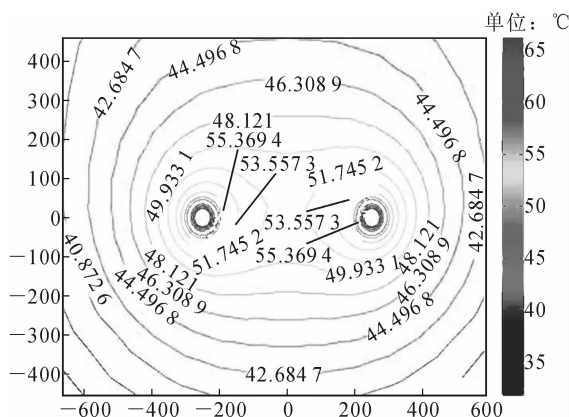


图 5 有限元计算电缆原始结构温度场分布结果

Fig. 5 The result of temperature field of the original cable structure

温度分布结果表明:电缆模型中温度最低处为土壤,温度值为 30 ℃,温度最高处为电缆线芯,温度

值为 $68.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于应用 IEC 60287 标准计算出的电缆载流量存在裕量, 因此将 IEC 60287 标准计算得到的载流量 $1\ 094\text{ A}$ 代入有限元计算模型中算得的线芯温度应该略低于电缆最高工作温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.2 有限元方法计算两层简化结构线芯温度

应用式(6)将 DC 200 kV-YJQ41 型号电缆的结构简化为两层, 即将除线芯外的各层等效为一层, 等效层与原结构中的线芯构成两层简化结构, 等效后的两层参数见表 5。

表 5 DC 200 kV-YJQ41 电缆两层简化结构主要参数

Table 5 Parameters of the simplified structure of DC 200 kV-YJQ41 cable

电缆结构	直径/mm	等效导热系数/[W·(mm·K) ⁻¹]
线芯导体	38.0	0.400 000
等效层	128.8	0.000 404

建立电缆两层简化结构有限元计算模型, 模型示意图见图 6。

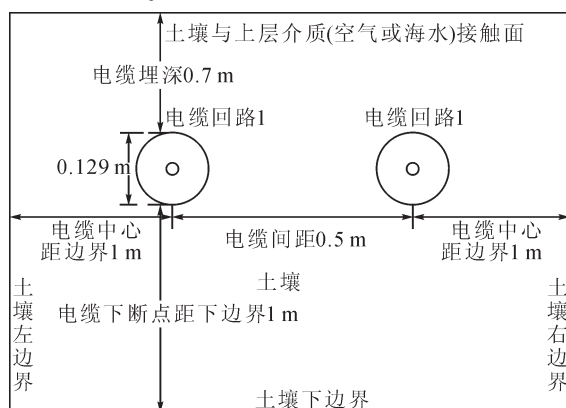


图 6 电缆两层简化结构计算模型示意图

Fig. 6 Calculation model of the simplified cable structure

图 6 所示模型中的边界条件、敷设条件均与图 4 中的电缆原始结构模型的边界条件、敷设条件相同, 应用有限元方法计算直流电缆两层简化结构模型 $1\ 094\text{ A}$ 时的温度场分布, 得到的温度分布图见图 7。

应用有限元计算 DC 200 kV-YJQ41 型号电缆两层简化结构的温度场分布结果显示, 等效模型中线芯温度为 $67.25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与原始结构的线芯温度计算结果 $68.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 吻合, 说明两层简化结构的线芯温度计算结果是准确的。

4 两种结构的有限元计算量对比

直流电缆的结构简化为两层后, 应用有限元方法计算温度场以及载流量时, 有限元方法的计算量会得到减少, 这是因为有限元网络剖分时产生的有限单元数量和网络结点都大大减少了, 下面详细对

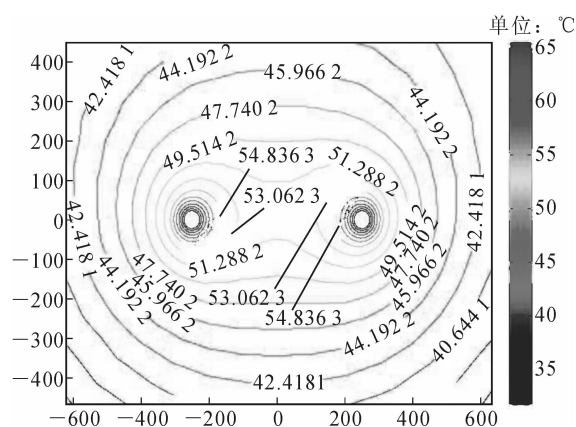


图 7 有限元计算电缆简化结构温度场分布结果

Fig. 7 The result of temperature field of the simplified cable structure

比有限元方法计算直流电缆原始结构和简化结构的计算量。

4.1 两种结构有限元网络剖分对比

以陆地直埋敷设条件的电缆为例, 电缆模型如图 3 所示, 简化后的电缆结构模型如图 4 所示, 现分别对两个模型进行有限元网络剖分, 剖分方法均为三角形自适应网络剖分。

电缆原始结构有限元网络剖分后的结果示意图见图 8。图 8 的剖分网络中三角单元数量为 $19\ 908$, 网络结点数量为 $10\ 003$ 。

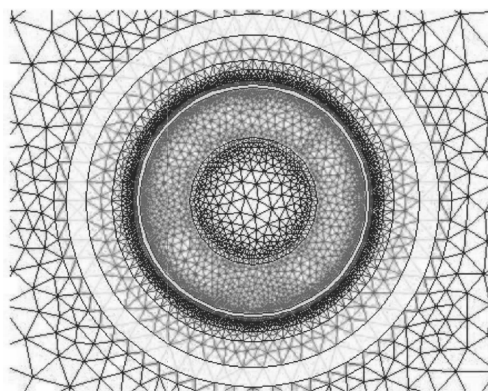


图 8 电缆原始结构有限元网络剖分示意图

Fig. 8 The finite element mesh result of the original cable structure

电缆简化结构有限元网络剖分后的结果示意图见图 9。图 9 的剖分网络中三角单元数量为 $3\ 486$, 网络结点数量为 $1\ 792$ 。

两种结构的有限元网络剖分结果表明: 对简化后的电缆结构进行有限元网络剖分产生的有限单元数量和网络结点数量远远少于电缆原始结构的有限元网络, 电缆结构简化后的有限元网络三角单元数量为简化前的 17.51% , 电缆结构简化后的网络结点数量为简化前的 17.91% 。

直流电缆的两层简化结构能够大量减少有限

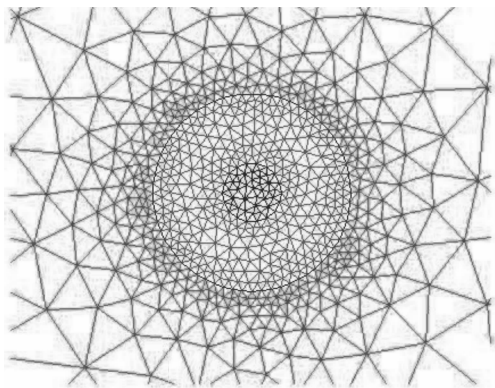


图9 电缆简化结构有限元网络剖分示意图

Fig. 9 The finite element mesh result of the simplified cable structure

元网络中3件单元和网络结点的数量的原因如下:

1)直流电缆的两层结构直接简化了电缆模型的结构,使其从10层减少为两层。

2)在进行有限元网络剖分时,如果两种邻接介质的物性参数不同,则两种邻接介质的分界处要进行有限元网络的细分,即分界处附近的网络剖分密度要大幅度增加以保证有限元运算的准确性。由于电缆的原始结构为多层同心圆,且各层的导热系数不尽相同,所以每两层的邻接处附近都要进行有限元网络的细分;而简化结构中需要进行有限元网络细分的位置只有线芯与等效层的邻接处以及等效层与土壤的邻接处,因此有效减少了剖分出的有限单元数量和网络结点数量。

4.2 两种结构有限元方程系数矩阵维数

在应用有限元方法计算电缆载流量或温度场的过程中,完成对计算区域的有限元网络剖分之后,需要对每个有限单元进行温度插值,再将所有三角单元的插值函数合成为总体温度场求解方程,总体温度场求解方程形式见式(7)。

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ & & \ddots & \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中: T_i 为结点*i*的温度,除温度已知点外其余均为待求量; p_i 表示结点*i*的热源;

$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ & & \ddots & \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix}$ 为温度系数矩阵,简称矩阵 $[K]$ 。通

过求解式(7),可以得到剖分网络中每一结点的温度值,即温度场分布。

直流电缆两层简化结构对于有限元方程求解

计算量的减少体现在以下两方面:

1)对有限元剖分网络中每个有限单元进行温度插值时,由于简化的电缆结构剖分网络的三角单元数量显著减少了,因此插值的工作量也随之减少。

2)方程(7)系数矩阵 $[K]$ 的维数即是有限元剖分网络中的结点数,电缆结构简化后剖分网络中结点数明显减少,从10 003个结点减少为1 792个结点,因此矩阵 $[K]$ 也从10 003维方阵减少为1 792维方阵,这将会极大程度的减少方程求解的计算量。

5 结语

文中应用等效导热系数简化了直流电缆的结构,使其在进行有限元方法求解载流量的计算量得到明显减少,从而达到简化有限元计算,增加有限元方法在电缆工程中的推广应用的目的。

文中首先根据等效导热系数的概念给出了直流电缆的两层简化结构。之后应用这种简化结构进行了给定条件下电缆线芯温度的求解,并将求解结果与厂家给出的技术数据以及有限元方法对电缆原始结构的求解结果进行对照,验证了两层简化结构在求解电缆线芯温度时的结果是准确的。最后文中详细论述了这种简化结构能够显著减少有限元方法的计算量的原因:由于在有限元网络剖分是能够有效减少有限单元和网络结点的数量,因此能够有效减少网络剖分的工作量、明显减少求解有限单元插值函数的计算量以及显著降低式(7)所示有限元求解方程的系数矩阵维数。

参考文献:

- [1] BENATO R, PAOLUCCI A. 超高压交流地下电力系统的性能和规划[M]. 北京:机械工业出版社,2012:6-7.
BENATO R, PAOLUCCI A. EHV AC undergrounding electrical power performance and planning[M]. Beijing: China Machine Press, 2012:6-7.
- [2] 顾金,王俏华,李旭光,等. 30 kV 直流 XLPE 电缆电场及温度场的仿真计算[J]. 电线电缆,2009(6):9-12.
GU Jin, WANG Qiaohua, LI Xuguang, et al. Simulation of electric field and temperature field in 30 kV DC XLPE cable[J]. Electric Wire & Cable, 2009(6):9-12.
- [3] STENDIUS L, ERIKSSON K. HVDC light-an excellent tool for city center infeed[C]//Power Conference. Singapore: [s.n.], 1999:1-7.
- [4] ASPLUND G, ERIKSSON K, TOLLERZ O. Land and sea cable interconnections with HVDC light [C]//CEPSI2000-conference. Philippines: [s.n.], 2000.
- [5] 杨黎明,朱智恩,杨荣凯,等. 柔性直流电缆绝缘料及电

- 缆结构设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 117-124.
- YANG Liming, ZHU Zhi'en, YANG Rongkai, et al. Insulation material and structure design of HVDC flexible cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 117-124.
- [6] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
- XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [7] 杨小静. 交联电缆额定载流量的计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(z1): 11-12.
- YANG Xiaojing. Calculation of rated current of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(z1): 11-12.
- [8] 牛海清, 王晓兵, 张尧. 基于迭代法的单芯电缆载流量的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 41-44.
- NIU Haiqing, WANG Xiaobing, ZHANG Yao. Study of ampacity of single-core cable based on iterative method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 41-44.
- [9] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1—2001 Calculation of current rating- current rating equations (100% load factor) and calculation of losses[S], 2001.
- [10] 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): 15-29.
- [11] 张哲任, 徐政, 徐韬, 等. 采用有限体积法的特高压直流输电系统接地极稳态温度场仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 328-334.
- ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Tao, et al. Steady-state temperature field simulation analysis of ultra high voltage DC transmission system grounding electrode using finite volume method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 328-334.
- [12] ANDERS G J, RADHAKRISHNA H S. Power cable thermal analysis with consideration of heat and moisture transfer in the soil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988(3): 1280-1285.
- [13] KOCAR I, ERTAS A. Thermal analysis for determination of current carrying capacity of PE and XLPE insulated power cables using finite element method[C]//Proc. IEEE Melecom.[S.l.]: IEEE, 2004: 905-908.
- [14] REDDY C C, RAMU T S. On the computation of electric stress and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., 2006, 13(6): 1236-1244.
- [15] KAHOURZADE S, A MAHMOUDI, TAJ B N, et al. Ampacity calculation of the underground power cables in voluntary conditions by finite element method[C]//2011 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI-CON). Khon Kaen: IEEE, 2011: 657-660.
- [16] 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.
- [17] 文红. 提高 110 kV 单芯高压电缆载流量的可行性分析和计算[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- WEN Hong. Analysis and calculation the possibility of improving the current ampacity of the 110 kV single-core high voltage cables [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [18] 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.
- [19] 周晓虎. 地下高压电力电缆温度场数值计算[D]. 长春: 东北电力大学, 2008.
- ZHOU Xiaohu. Numerical computation on temperature field of underground high voltage cables [D]. Changchun: Northeast Dianli University, 2008.
- [20] 孔祥谦, 王传溥. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- KONG Xiangqian, WANG Chuanpu. Application of finite element in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 28-30.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 28-30.
- 刘畅(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电缆参数计算。
- 徐政(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术。
- 宣耀伟(1961—), 男, 高级工程师, 从事海洋输电技术相关研究工作。
- 张健(1985—), 女, 工程师, 从事海洋输电技术相关研究工作。