

基于有限元仿真的三芯海底电缆温度场分析

刘晓亮¹, 魏俊²

¹中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

²西南石油大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月30日

摘要

随着对海上风电、海底石油与天然气的开发, 海底电缆对于电力传输的发挥着重要的作用, 但运行时会产生大量的热, 对于输电产生许多不利影响, 因此海底电缆温度场分析值得重点关注。目前, 国内外学者也针对海底电缆的载流量和温度场等进行了大量的研究, 本文使用ANSYS有限元仿真软件对三芯光纤复合海底海缆的温度场进行计算, 模拟不同季节与不同海域土壤情况下, 分析了不同环境温度、不同土壤导热系数与不同埋设深度对三芯海缆直埋敷设时温度场的影响, 结果表明海缆导体温度与环境温度呈正相关关系且环境温度每升高4℃导体温度升高约3℃; 与埋设深度也呈现正相关关系; 与土壤导热系数呈负相关关系。为三芯海缆的设计以及海缆输电线路规划提供了参考。

关键词

海底电缆, 温度场, 有限元, 环境温度, 导热系数

Analysis of Temperature Field of Three-Core Submarine Cable Based on Finite Element Simulation

Xiaoliang Liu¹, Jun Wei²

¹Tianjin Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin

²Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 21st, 2022; accepted: Mar. 22nd, 2022; published: Mar. 30th, 2022

Abstract

With the development of offshore wind power, submarine oil and natural gas, submarine cables play an important role in power transmission, but a large amount of heat is generated during

文章引用: 刘晓亮, 魏俊. 基于有限元仿真的三芯海底电缆温度场分析[J]. 电气工程, 2022, 10(1): 30-38.

DOI: 10.12677/jee.2022.101004

operation, which has many adverse effects on power transmission. Therefore, the analysis of the temperature field of submarine cables is worthy of attention. At present, scholars at home and abroad have also conducted a lot of research on the current carrying capacity and temperature field of submarine cables. In this paper, the ANSYS finite element simulation software is used to calculate the temperature field of the three-core optical fiber composite submarine cable, and simulate the soil in different seasons and different sea areas. In this paper, the influence of different ambient temperatures, different soil thermal conductivity and different burial depths on the temperature field of the three-core submarine cable during direct burial is analyzed. The results show that the conductor temperature is positively correlated with the ambient temperature, and the conductor temperature increases by about 3°C for every 4°C increase in ambient temperature; positive correlation with burial depth; negative correlation with soil thermal conductivity. It provides a reference for the design of the three-core submarine cable and the planning of the submarine cable transmission line.

Keywords

Submarine Cable, Temperature Field, Finite Element, Ambient Temperature, Thermal Conductivity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海底电缆是在海底敷设的电缆, 具有通信和电力两大功能, 近年来海上风电场的建设发展迅速, 海上风电产业是海底电缆最主要的终端应用市场, 作为其与陆地大电网连接的重要枢纽, 海底电缆输电技术在我国有迫切的研究需要和工程应用前景[1]。海缆温度作为反映海缆使用情况的一项重要指标, 其涉及到海缆线路安全可靠、经济合理的运行以及海缆使用寿命问题, 交联聚乙烯(XLPE)电缆作为现在应用最广泛的电缆, 运行时会在强电流的作用下产生大量的热, 然而这些热会对电缆的寿命产生巨大影响。相关研究发现当绝缘聚合物温度大于耐受温度的 8%时, 寿命降为原来的 1/2, 大于耐受温度的 15%时, 寿命降为原来的 1/4 [2]。由此看来, 对于海缆温度场分析的意义是不言而喻的。

目前, 对于单芯海缆的温度场分布与载流量的分析比较多, 文献[3]利用 Comsol 有限元仿真软件对 160 kV 交联聚乙烯直流海底电缆不同应急负荷下的温度场进行了仿真模拟分析; 文献[4]利用 Comsol 软件对 110 kV 单芯海缆的对温度场进行了仿真并通过设计海缆热循环系统对载流量进行了试验研究; 文献[5]采用了 Comsol 有限元仿真软件对 500 kV 直流 XLPE 海缆稳态温度分布进行了计算并对其暂态与稳态电场分布也进行了仿真研究; 文献[6]参照 IEC 60287 标准进行计算, 建立了海缆的精确热路模型并结合有限元法分析了 110 kV 高压单芯交联聚乙烯海缆的温度场; 文献[7]利用 Comsol 软件对 160 kV 直流 XLPE 海底电缆在带保护套管理地敷设方式下的温度场进行了仿真分析; 文献[8]利用 Comsol 软件针对 160 kV 直流 XLPE 海缆建立了三维仿真模型, 并提出了一种电缆暂态模型的简化方法; 文献[9]利用有限元分析软件 COMSOL 建立了 500 kV 高压直流海缆热-流耦合模型, 对比分析了不同冷却模式对海缆载流量的提升能力。相比之下, 对于三芯高压海缆的相关研究还比较少; 文献[10]通过建立热路模型的解析法与利用 Comsol 软件仿真的有限元法对三芯海缆温度场进行了对比分析。针对电力电缆温度场与载流量计算, 现在主要有两种使用更为广泛的计算方法。第一种是解析算法, 其主要是基于国际电工委员会(IEC)标准建立电力电缆热

路模型来求解载流量; 第二种是数值计算法, 其主要以电缆温度场作为理论依据, 通过设置边界条件代替复杂条件下的工作情况, 包括了有限元法、边界元法[11]、有限差分法[12]等。

本文针对国内某 35 kV 高压三芯交联聚乙烯海缆作为研究对象, 采用专业有限元分析软件建立温度场模型, 模拟不同季节与不同海域土壤情况下, 分析了不同环境温度、不同土壤导热系数与不同埋设深度对其直埋敷设时温度场的影响, 为海底电缆输电线路规划设计提供参考。

2. 基于 ANSYS 的海缆仿真模型

2.1. 海缆的物理模型与简化

35 kV 高压三芯交联聚乙烯光纤复合海缆的截面结构如图 1 所示, 主要由三个线芯、两个光纤单元及外层材料组成, 其中, 光纤单元作为分布式光纤测温的媒介, 对于海缆温度监测起着重要作用, 从内到外依次为光纤、不锈钢管、钢丝加强、绕包包带与 PE 护套; 线芯从内到外依次为阻水铜导体、导体屏蔽、XLPE 绝缘层、绝缘屏蔽、半导电电阻水带、合金铅套、半导电 PE 护套; 外层材料从内到外依次为填充层、包带、PP 内垫层、镀锌钢丝铠装层、沥青及 PP 外被层。

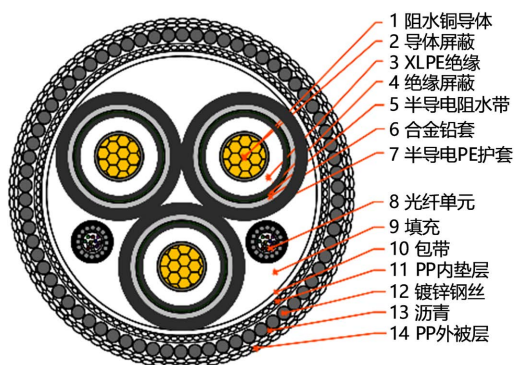


Figure 1. Cross-sectional view of fiber optic composite submarine cable structure
图 1. 光纤复合海底电缆结构截面图

海底电缆结构复杂, 为减少有限元分析计算量与计算时间, 在不影响计算精度的情况下, 本文将海底电缆中传热系数相近且互相接触的结构层进行合并简化。简化后的海缆结构包括 11 个部分, 将单模光纤与光纤护套合并, 统称为光单元护套; 将导体屏蔽层、XLPE 绝缘层、绝缘屏蔽层合并, 统称为绝缘层; 将包带、PP 内垫层合并, 统称为内垫层; 将沥青、PP 外被层合并, 统称为外被层。图 2 为合并简化后海底电缆的物理模型, 表 1 为合并简化后海底电缆各层尺寸结构参数。

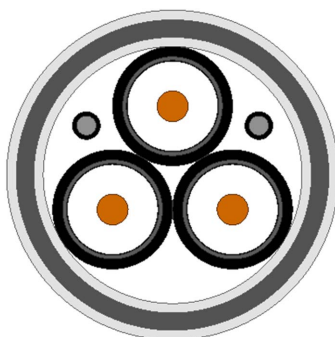


Figure 2. Simplified submarine cable model
图 2. 简化后的海底电缆模型

Table 1. Size and structure parameters of each layer of submarine cable**表 1.** 海底电缆各层尺寸结构参数

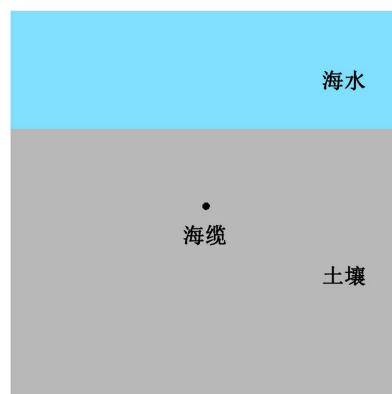
结构名称	厚度/(mm)	外径/(mm)	密度/kg·m ⁻³	传热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)
阻水铜导体	-	20.5	8933	400	385
绝缘层	12.1	44.7	930	0.215	2300
半导体阻水带	0.8	46.3	930	0.15	1580
合金铅套	3	52.3	11,336	35	129
PE 护套	2.3	56.9	930	0.4	2300
填充层	-	122.8	1100	0.35	1900
光单元护套	3	11.4	930	0.4	2300
光单元钢管	-	8.4	7850	60.5	434
内垫层	1.95	126.7	935	0.46	2300
镀锌钢丝铠装	5.0	136.7	7872	45	448
外被层	4.0	144.7	1100	0.35	1900

电缆导体通过电流时会产生功率损耗, 损耗会以热能的形式从导体向外被层传导, 最终在导体与外被层之间形成稳定的温度场。为简化分析, 本文对于仿真模型做出如下假设:

- 1) 电缆各层的内外表面为等温面;
- 2) 电缆的几何参数为常数;
- 3) 仅考虑导体损耗、绝缘层损耗、合金铅套损耗和铠装损耗;
- 4) 不计导体屏蔽层、绝缘屏蔽层、铠装层热阻。

2.2. 海缆温度场有限元分析模型

海缆在任一种敷设方式下, 忽略其敷设路线上的环境因素时, 那么海缆轴向的温度场分布将不会产生变化, 只需考虑海缆本体径向热场分布即可, 因此在进行海缆温度分析时, 可以将三维分析简化为二维分析。如下图 3 海缆直埋敷设闭合计算区域模型所示, 已有研究表明, 距离电缆 2 m 以外的区域不受电缆发热的影响; 海底电缆采用直埋敷设方式时, 埋设深度 ≥ 0.5 m; 据此构建长和宽都为 5 m 的方形区域, 其中, 海水域大小为 5 m \times 1.5 m, 土壤域大小为 5 m \times 3.5 m, 海缆埋设深度为 1 m。

**Figure 3.** Submarine cable direct buried laying diagram**图 3.** 海缆直埋敷设示意图

2.3. 有限元模型边界条件设定

电缆运行状态的变化是一个从暂态逐渐到稳态的过程, 电缆通电之后, 其温度逐渐上升并以缆芯为起点逐步向外传导, 在投入运行一段时间后, 电缆运行进入稳态, 此时系统的热流以及温度场中各点温度不再随时间的变化而改变。本文研究重点针对稳态导热问题进行分析, 因此可以把电缆的温度场看成有热源的稳态二维导热问题, 对此要应用有热源的稳态导热微分方程[13]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v \quad (1-1)$$

式中: $\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$ 为微元体吸热造成的内能增加; T 为瞬态温度; τ 为进行时间; κ 为导热系数; q_v 为内热源。

导热微分方程的求解需要用到三类边界条件。边界条件是在运动边界上对方程组求解, 是一种解微分方程, 主要针对有限元进行计算, 不管是对于 ANSYS 还是 COMSOL, 都需要满足条件[14]。

第 1 类边界条件是已知边界温度值。

$$\begin{cases} T|_{\Gamma} = T_w \\ T|_{\Gamma} = f(x, y, t) \end{cases} \quad (1-2)$$

式中: Γ 为物体边界; T_w 为壁面温度。

第 2 类边界条件是已知边界上法向热流密度。

$$\begin{cases} \kappa \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} + q_{\theta} = 0 \\ \kappa \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} + g(x, y, t) = 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中: q_{θ} 为热流密度; $g(x, y, t)$ 为已知热流密度函数。

第 3 类边界条件是对流边界条件, 即已知边界上对流换热系数和流体温度。

$$\left. -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma} = \alpha (T - T_f) \quad (1-4)$$

式中: α 为物体表面换热系数; T_f 为周围流体温度。

海底电缆及其敷设环境整体模型下边界为恒定温度 15°C , 为热学第一类边界条件; 整体模型左右边界上法向热流密度为 0, 为热学第二类边界条件; 模型中上边界为海水对流换热, 由于存在换热系数, 设置为热学第三类边界条件。

2.4. 有限元模型网格划分

基于有限元法的数值计算就是在划分的每个网格单元中分别进行计算, 其中网格单元为三角形单元, 并通过三角形单元对海缆模型进行有限元网格剖分。本文针对海底电缆及周围重点分析部位进行密集的网格划分, 采用设置网格大小方式划分; 距离较远的水及土壤区域进行相对粗糙的网格划分, 采用自适应网格划分方式划分。按这样视情况分部分设置网格大小, 以保证计算精度的情况下相应的减小计算量。海缆网格划分示意图如图 4 所示。

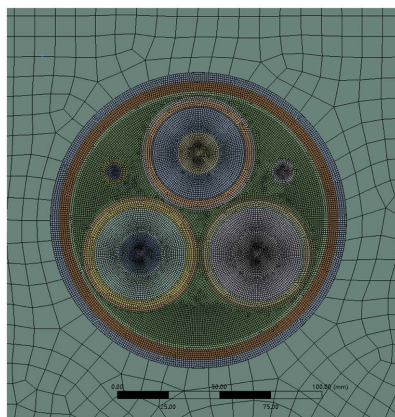


Figure 4. Submarine cable meshing

图 4. 海缆网格划分

3. 海缆温度场仿真结果与分析

在海缆直埋敷设情况下,埋设深度为 1 m,敷设海域环境温度为 22℃,土壤导热系数为 1.989 W/(m·K),底层海水温度为 15℃时,分别基于上述建立的海缆有限元模型对海缆温度场进行仿真分析。图 5 为基于有限元仿真的载流量为额定载流量时局部与全局温度分布云图。如图 5 所示,海缆线芯铜导体达到了最高温度 90℃,热量由线芯向外传导,热量传导至土壤中时,海缆周围温度分布呈现椭圆状。温度分布密度由海缆线芯至土壤呈现由密到疏的状态,即相比于海缆较远处温度下降趋势,海缆周围温度下降较快。

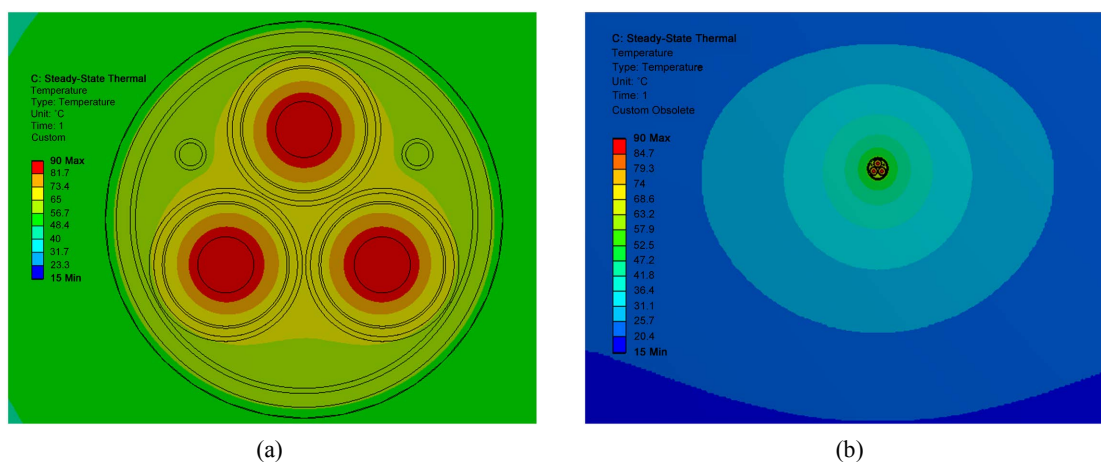


Figure 5. Cloud map of temperature distribution (a) Local temperature distribution of submarine cable; (b) Global temperature distribution

图 5. 温度分布云图。(a) 海缆局部温度分布; (b) 全局温度分布

海缆的环境温度指海缆路线规划海域下海缆的预安装地带的温度,即未受其他外界条件干预的初始温度。模拟一年四季下海缆环境温度的变化,在其他因素变量不变时,分别分析了 6℃、10℃、14℃、18℃、22℃和 26℃不同环境温度下的温度分布。选取各环境温度下的导体温度得到对应关系如表 2 所示;图 6 为环境温度与导体温度对应关系曲线。如表 2 所示,当环境温度超过 22℃时,导体温度超过了 90℃,即超过了 IEC 标准规定的海缆最大运行温度。如图 6 所示,海缆导体温度大小与环境温度呈线性关系,随着环境温度的升高,导体温度也随着升高且可以发现随着环境温度以 4℃递进升高时,导体温度上升幅度基本保持恒定,约为 3℃。

Table 2. Corresponding relationship between ambient temperature and conductor temperature
表 2. 环境温度与海缆导体温度对应关系

环境温度/°C	导体温度/°C
6	78.9
10	81.7
14	84.5
18	87.2
22	90.0
26	92.8

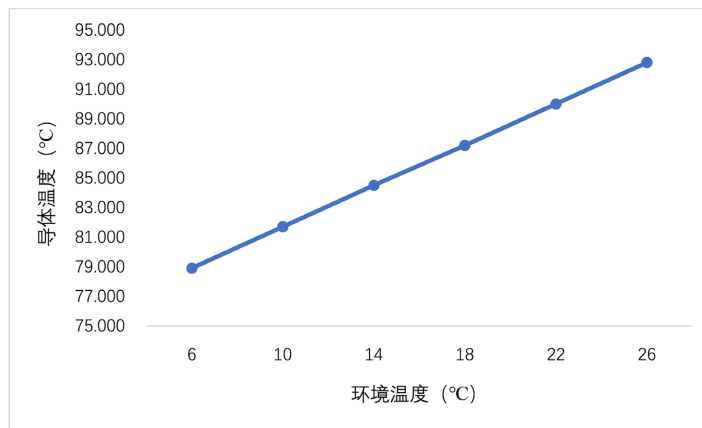


Figure 6. Corresponding relationship between ambient temperature and submarine cable conductor temperature
图 6. 环境温度与海缆导体温度对应关系曲线

土壤的导热系数是与土质固相材料、干密度、粒度分布、压紧程度、湿度和有机物含量有关的函数，土壤的热传导过程非常复杂。海底土壤固相结构多变，海底土壤导热系数又随着土壤质地与湿度的不同，变化范围较大，对于距离长远的海底输电线路而言，不同规划线路海域下的土壤导热系数分布不一，因此海底土壤导热系数的影响也是不容忽视的。海缆敷设于海床下深层土壤内，在其他因素变量不变时，分别分析了土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)、0.8 W/(m·K)、1.1 W/(m·K)、1.4 W/(m·K)、1.7 W/(m·K)、2.0 W/(m·K)的温度分布。同样的选取不同土壤导热系数下导体温度得到对应关系如表 3 所示；图 7 为土壤导热系数与导体温度对应关系曲线。如图 7 所示，海缆导体温度大小与土壤导热系数呈现负相关关系，随着土壤导热系数的升高，导体温度逐渐减小，但减小的幅度由大变小。

Table 3. Corresponding relationship between soil thermal conductivity and conductor temperature
表 3. 土壤导热系数与海缆导体温度对应关系

土壤导热系数(W/(m·K))	导体温度/°C
0.5	192.2
0.8	141.0
1.1	117.8
1.4	104.5
1.7	95.8
2.0	89.8

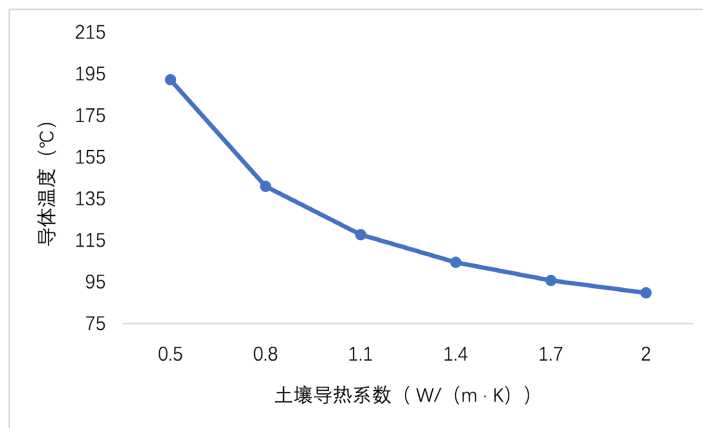


Figure 7. Corresponding relationship between soil thermal conductivity and submarine cable conductor temperature
图 7. 土壤导热系数与海缆导体温度对应关系曲线

海底地质结构复杂, 埋设于海床下的电缆可能因为地质扰动或者由其他环境因素导致的土壤结构改变, 改变其埋设位置, 不能保证海缆一直处于一个合适的埋设深度下, 因此海缆埋设深度对于海缆也是具有一定影响的。保持其余因素变量不变, 分别对埋设深度为 500 mm、700 mm、900 mm、1100 mm、1300 mm、1500 mm 的温度分布进行仿真模拟。同样的选取不同埋设深度下导体温度得到对应关系如表 4 所示; 图 8 为埋设深度与导体温度对应关系曲线。如图 8 所示, 海缆导体温度变化与海缆埋设深度的增

Table 4. Corresponding relationship between submarine cable burial depth and submarine cable conductor temperature
表 4. 土海缆埋设深度与海缆导体温度对应关系

埋设深度(mm)	导体温度/°C
500	84.7
700	87.6
900	89.5
1100	90.6
1300	91.1
1500	91.2

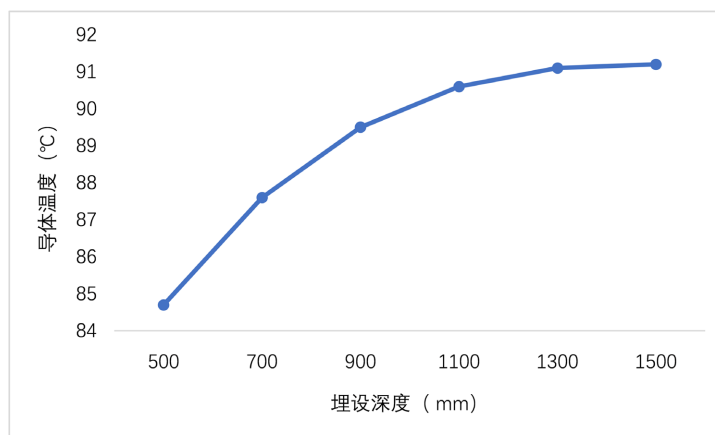


Figure 8. Corresponding relationship between submarine cable burial depth and submarine cable conductor temperature
图 8. 海缆埋设深度与海缆导体温度对应关系曲线

长呈现正相关, 但增长幅度逐渐变小, 最终趋近于稳定, 即当埋设深度超过 1500 mm 后, 土壤导热作用逐渐取代海水散热效果, 海缆导体温度不再随着埋设深度变化而变化。

4. 结论

利用 ANSYS 有限元仿真软件对建立了三芯交联聚乙烯海缆及其直埋敷设环境的温度场分析模型, 有效避免了传统解析算法所需的庞大计算量, 针对直埋敷设情况下的海缆进行稳态温度场计算, 分析了环境温度、土壤导热系数与埋设深度对三芯海缆的温度场的影响。得出以下结论:

海缆导体温度大小与环境温度呈正相关关系, 随着环境温度的增大, 海缆导体温度也随之增大且增大的温差幅度基本为同一幅值, 即环境温度每升高 4℃, 海缆导体温度也升高约 3℃; 海缆导体温度大小与海缆埋设深度同样的呈正相关关系, 随着海缆埋设深度的增加, 海缆导体温度也相应增加, 但增大的幅度逐渐减小且埋设到达一定深度之后, 海缆温度将不再受埋设深度的影响而只受土壤导热作用; 海缆导体温度大小与土壤导热系数呈现负相关关系, 随着土壤导热系数的升高, 导体温度逐渐减小, 但减小的幅度从大到小。

在研究上述环境变量对海缆温度的影响时, 均出现了海缆温度超过最大运行温度 90℃ 的情况, 这对于海缆使用寿命将带来严重威胁, 因此需要提前细致勘查海底土壤导热系数与环境温度, 减小海缆线路直埋沿线段的这两种因素分布不均匀给海缆输电线路带来的不利影响。

参考文献

- [1] 李萌, 牛胜锁, 刘玉芹, 赵可为. 基于多场耦合模型的海底电缆载流量和温度场计算研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 12-16+23.
- [2] 张巍伟. 基于解析法和有限元法的海底电缆温度场分析[J]. 船电技术, 2020, 40(10): 40-44.
- [3] 刘贺晨, 张铭嘉, 刘云鹏, 刘爱静, 徐晓彬. ±160 kV 交联聚乙烯直流海底电缆动态载流特性试验及仿真研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 19-27.
- [4] 张磊, 宣耀伟, 乐彦杰, 张占奎, 李琰, 沈耀军. 110 kV 单芯海缆的载流量计算、温度场仿真及其热循环试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 135-140+146.
- [5] 刘英, 张申冬, 曹俊平, 王少华. 500 kV 直流 XLPE 海缆的热场及电场仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 7-15.
- [6] 段佳冰, 尹成群, 吕安强, 李永倩. 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.
- [7] 刘云鹏, 许自强, 陈铮铮, 刘贺晨. ±160 kV 直流 XLPE 海底电缆载流特性仿真及试验[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 130-136.
- [8] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 黄吉超, 傅明利, 王邸博, 侯帅. 高压直流海底电缆三维仿真模型简化等效研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(4): 1-6.
- [9] Zhou, B.D., Le, Y.J., Fang, Y.L., Yang, F., Dai, T., Sun, L., Liu, J.P. and Zou, L.K. (2018) Temperature Field Simulation and Ampacity Optimisation of 500 kV HVDC Cable. *The Journal of Engineering*, 2019, 2448-2453. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8586>
- [10] 杨其鹏. 考虑不同接头影响下的海底电缆温度场分析与载流量计算[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [11] Gela, G. and Dai, J. (1988) Calculation of Thermal Fields of Underground Cables Using the Boundary Element Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5, 1341-1347. <https://doi.org/10.1109/61.193929>
- [12] Hiranandani, A. (1991) Calculation of Conductor Temperatures and Ampacities of Cable Systems Using a Generalized Finite Difference Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6, 15-21. <https://doi.org/10.1109/61.103717>
- [13] 秦春旭, 栗丙典, 李国明, 杨晓辉, 林长海. 基于有限元对 220 kV 三芯海缆温度场的数值计算[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(4): 5-10.
- [14] 吴浩. 基于计算机技术的海缆温度场建模及应用研究[J]. 粘接, 2021, 48(10): 76-80.