

Electromagnetic-Thermal-Flow Multi-Physics Field Coupling Simulation of Multi-Loop and Different Voltage Grade Cable Tunnel

Yu Xiang¹, Hao Yue¹, Jiaming Liang², Heng Liu^{2*}, Jinxian Li²

¹Central Southern China Electric Power Design Institute Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Hubei Wuhan

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: *3461632614@qq.com

Received: Sep. 12th, 2019; accepted: Oct. 1st, 2019; published: Oct. 8th, 2019

Abstract

Compared with the laying of ordinary direct buried cables and drainage cables, the calculation of temperature field of cable laying in cable tunnels with different voltage grades in multiple circuits is relatively complicated. This paper, based on ANSYS finite element simulation software, establishes a multi-loop cable tunnel electromagnetic-heat-flow multi-physical field coupling model, studies the characteristics of electric field distribution and temperature field distribution in cables with different voltage levels, and verifies the electric field distribution of cables with different voltage levels with analytical method. The results show that the maximum insulation field strength of 110 kV, 220 kV and 500 kV cables is 13.18/17.95/32.67 kV/cm respectively. When the "line" shape is adopted, the temperature of the intermediate phase cable is higher than that of the two sides. When the "triangle" shape is adopted, the temperature of the A phase cable conductor is higher than B and C phases. The work of this paper can provide reference for the calculation of cable carrying capacity in cable tunnel laying with different voltage levels in multiple circuits.

Keywords

Cable Tunnel, Finite Element, Electric Field, Temperature, Multi-Physics Field

多回路、不同电压等级电缆隧道电磁-热-流多 物理场耦合仿真

向宇¹, 岳浩¹, 梁家鸣², 刘恒^{2*}, 李晋贤²

*通讯作者。

文章引用: 向宇, 岳浩, 梁家鸣, 刘恒, 李晋贤. 多回路、不同电压等级电缆隧道电磁-热-流多物理场耦合仿真[J]. 智能电网, 2019, 9(5): 182-190. DOI: 10.12677/sg.2019.95020

¹中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉

²重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: *3461632614@qq.com

收稿日期: 2019年9月12日; 录用日期: 2019年10月1日; 发布日期: 2019年10月8日

摘要

与普通直埋电缆、排管电缆等敷设相比, 多回路不同电压等级电缆隧道敷设电缆的温度场计算相对较复杂。本文基于ANSYS有限元仿真软件, 建立多回路电缆隧道电磁-热-流多物理场耦合模型, 研究不同电压等级内电缆电场分布、温度场分布特性规律, 并采用解析法对不同电压等级电缆电场分布进行了验证。结果表明: 110 kV、220 kV、500 kV电缆绝缘最大场强分别为13.18/17.95/32.67 kV/cm; 采用“一”字型敷设时, 中间相电缆温度较两侧相高, 采用“品”字型敷设时, 其A相电缆导体温度较BC两相高。论文工作可为多回路不同电压等级电缆隧道敷设电缆载流量的计算提供参考。

关键词

电缆隧道, 有限元仿真, 电场, 温度, 多物理场

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着经济建设和电力工业的不断发展, 国家越来越重视环境的保护以及电网建设的美观性, 不仅城市配电网采用地下电缆输电, 在高压、甚至超高压也开始采用地下电缆输电。由于高压、超高压电力电缆截面较大, 输送功率较高, 采用电缆隧道敷设方式能较好的满足高压、超高压电力电缆输电。电缆隧道中敷设的电缆一般是多回路高电压等级电缆, 各回路之间的热损耗会相互影响, 从而导致电缆隧道内温度分布发生变化。

准确计算电缆隧道内温度分布对提高电缆利用率、确保电缆安全可靠运行以及电缆载流量的评估具有重要意义[1] [2]。采用 IEC 标准的热路法对电缆温度场计算是目前较为普遍的一种方式, 但热路法求解误差太大, 难以考虑周围复杂的环境因素, 计算结果偏向于保守[3]。采用有限元方法能有效分析电缆各个物理场之间的相互影响关系, 并能实时考虑电缆隧道周围环境对电缆温度分布的影响[4] [5]。由于土壤、隧道内空气对电缆温度分布均有较大的影响, 采用热路分析法并考虑土壤中水分的迁移和封闭空气层的流动性对外部热阻的影响是计算直埋电缆温度场的有效方法[6], 但对于隧道电缆其并不适用。电缆隧道温度场的计算需要考虑土壤热导系数、环境温度、外部热源和土壤深层温度等因素的影响[1]。另外隧道电缆温度分布的计算有助于电缆载流量的计算分析, 文献[7]采用有限元仿真研究了 110 kV 不同电缆排列方式下电缆温度分布, 进而计算电缆载流量。文献[8]基于热-流耦合场仿真, 研究了风速以及各敷设参数(如空气温度、电缆外表面发射率等)对隧道电缆温度分布和载流量的影响。综述所述, 采用有限元数值计算方法对隧道电缆温度分布进行计算已是研究的一个重要手段, 这对电缆载流量的分配、负荷的调度具有重要意义。

本文基于 ANSYS 有限元仿真软件, 建立多回路电缆隧道电磁-热-流多物理场耦合计算模型, 研究不同电压等级内电缆电场分布、温度场分布特性, 并采用解析法对不同电压等级电缆电场分布进行了验

证。通过分析隧道内各回路电缆导体温度分布，明确电缆敷设方式对电缆温度的影响，了解隧道内空气自然对流散热机制。本文工作可为多回路不同电压等级电缆隧道敷设电缆载流量的计算提供参考。

2. 多物理场计算模型

2.1. 电磁场控制方程

采用涡流求解器对电缆电磁场进行求解，磁矢位和电位满足泊松方程：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \dot{\phi} = 0 \quad (2)$$

其中， $\dot{\mathbf{A}}$ 为磁矢位， $\dot{\phi}$ 为电位， ω 为角频率， ε_0 为真空的介电常数， ε_r 为相对介电常数， μ_0 为真空的磁导率， μ_r 为相对磁导率。

电缆包主绝缘、内外护套等多种介质，在不同介质的分界面有：

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \dot{\phi}_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \dot{\phi}_2}{\partial n} \quad (4)$$

其中， ε_1 和 ε_2 分别为介质 1 和介质 2 的相对介电常数， $\dot{\phi}_1$ 和 $\dot{\phi}_2$ 分别为分界面处介质 1 和介质 2 中的电位。

电场 $\dot{\mathbf{E}}$ 和磁场 $\dot{\mathbf{B}}$ 的计算公式为：

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi} \quad (6)$$

2.2. 热传导控制方程

根据傅里叶(Fourier)传热定律，可以得到电缆及电缆隧道内固体传热温度场的控制方程：

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (7)$$

其中， ρ 为物质密度， C_p 为比热容， T 为温度， λ 为导热系数(设各材料导热系数各向同性)， q_v 为单位体积产生的热源。

$$q_v = \frac{1}{2} \int_V \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^*}{\gamma} dV \quad (8)$$

其中， \mathbf{J}^* 为共轭电流密度， γ 为电导率。

由于金属的电导率是温度的函数[9]，当前温度下的电导率为：

$$\gamma = \frac{\gamma_{ref}}{1 + \beta(T - T_{ref})} \quad (9)$$

其中， γ_{ref} 是参考温度 T_{ref} 下的电导率， T 当前时刻的温度， β 电导温度系数，铜取 0.00389，铝取 0.0041。

2.3. 热对流控制方程

隧道内存在空气，在温度梯度的影响下将发生热对流现象，满足三大守恒方程。

质量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (10)$$

其中，速度矢量 $\mathbf{V} = (u, v, w)$ 。

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \mathbf{F} \quad (11)$$

其中， p 为静压， $\boldsymbol{\tau}$ 是应力张量， \mathbf{F} 为外力。

$$\boldsymbol{\tau} = \eta \left[(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{I} \right] \quad (12)$$

其中， η 为分子黏度， \mathbf{I} 为单位张量。

并引入 Boussinesq 假设，则此处的 \mathbf{F} 可写成：

$$\mathbf{F} = \rho g \alpha (T - T_{ref}) \mathbf{l} \quad (13)$$

其中， \mathbf{l} 为重力加速度与坐标轴的夹角的正弦值，本文重力加速度方向为 y 方向，因此 \mathbf{l} 在 y 方向取 1，在 x 轴方向取零。

能量守恒方程：

$$C_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (14)$$

3. 仿真模型

3.1. 物理模型

本文以 2600×2900 mm 明挖电缆隧道为研究对象，上中下三层分别敷设 110 kV、220 kV 和 500 kV 电力电缆，共 8 回。110 kV、220 kV 电缆采用“一”字型敷设，500 kV 电缆采用“品”字型敷设，220 kV 和 500 kV 之间预留的较大间距为备用层。

如图 1 所示，为电缆隧道示意图，各电缆外径以及各层间距均标于图中。各电压等级电缆结构如图 2 所示，表 1 为各电压等级电缆尺寸。

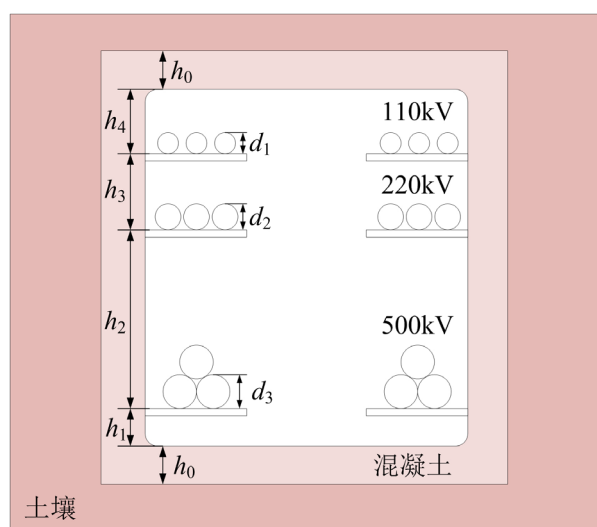


Figure 1. Cable tunnel diagram

图 1. 电缆隧道示意图

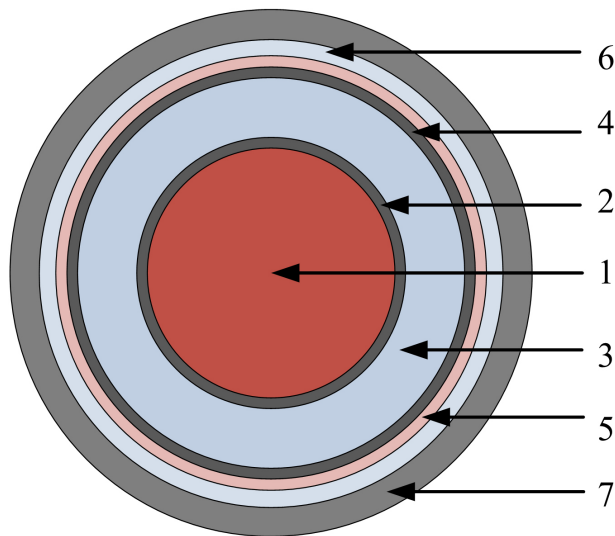


Figure 2. Cable structure diagram
图 2. 电缆结构示意图

1 导体(CO); 2 导体屏蔽(CS); 3 绝缘体(IN); 4 绝缘屏蔽(IS); 5 缓冲层(BL); 6 铝护套(LS); 7 外护套(OS)。

Table 1. Cable construction size
表 1. 电缆结构尺寸

尺寸	110 kV	220 kV	500 kV
导体直径	38.8	54.7	61.5
导体屏蔽厚度	1.7	1.7	2
绝缘厚度	16	24	31
绝缘屏蔽厚度	1	1	1.5
缓冲层厚度	4	4	3
铝护套厚度	2.3	2.8	3.3
外护套厚度	4.5	5	6

3.2. 边界条件及网格剖分

1) 电磁场边界条件

电缆缆芯电位为高电位，金属屏蔽和铝护套均接地，有：

$$\varphi|_{CO} = 110 / 220 / 500 \text{ kV} \tag{15}$$

$$\varphi|_{MS} = \varphi|_{LS} = 0 \tag{16}$$

磁矢位在电缆导体外部空间快速衰减，距离电缆表面 1 m 处其数值大小为约为 0，即外边界条件为：

$$A|_{out} = 0 \tag{17}$$

2) 流场边界条件

由于流体粘性和壁面对流体的阻力，在壁面附近形成一流体薄层，在这一流动边界层中流体的速度

迅速下降为 0。因此在隧道内壁和电缆外表面处的流体速度为 0，即无滑移边界条件：

$$V|_{wall} = 0 \quad (18)$$

3) 温度场边界条件

电缆隧道仿真主要包括恒温边界、恒流边界、辐射边界条件，即：

$$T|_S = const \quad (19)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_S = q_n \quad (20)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_S = \xi b (T_S^4 - T_f^4) \quad (21)$$

其中， $const$ 为常数， q_n 为垂直于面 S 的热流密度， ξ 为发射率， b 为玻尔兹曼常数， T_S 为表面温度， T_f 为环境温度(即参考温度)。

在电缆隧道土壤下壁面和上壁面为恒温边界条件；土壤左右壁面为恒流边界条件，热流为零；隧道内壁与空气接触的壁面为辐射边界条件。

4. 结果与分析

4.1. 电场分析

对 110 kV、220 kV 和 500 kV 电缆，在电缆导体和金属屏蔽之间施加最大幅值的电压，得到不同电缆电场分布如图 3 所示。电场均集中于绝缘层，绝缘最大电场分别为 13.18 kV/mm、17.95 kV/mm、32.67 kV/mm，并采用解析法对电场仿真进行验证，利用高斯定律求得多层介质电场计算公式为：

$$E_i = \frac{U}{r \varepsilon_i \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k} \right)} \quad (22)$$

其中， n 为单相绝缘介质层数， U 为绝缘层的电位差， ε_i 为各层介质相对介电常数， r 为径向距离。将仿真结果与解析算法进行对比，其误差均在满足范围以内，见表 2。

Table 2. Insulation maximum field strength

表 2. 绝缘最大场强

名称	110 kV 电缆	220 kV 电缆	500 kV 电缆
仿真值(kV/cm)	13.18	17.95	32.67
解析值(kV/cm)	12.97	17.53	32.25
误差(%)	1.6	2.4	1.3

4.2. 温度场分析

假设 110 kV、220 kV 和 500 kV 电缆的额定载流量分别为 1400 A、1800 A 和 2000 A。设电缆隧道上壁面温度为 30℃，下壁面温度为 20℃，左右壁面热流量为 2.2 W/m²，此时载流量分别为 1600 A、2000 A、2200 A 时，得到电缆隧道速度分布和温度分布如图 4 和图 5 所示。从图中看出，隧道内空气的流动决定了隧道内的温度分布，温度梯度越大的地方其空气流速就越大，且流速分布云图和温度分布云图具有相似性；此时电缆隧道最大温度出现在 500 kV 电缆导体，为 91.5℃，220 kV 和 110 kV 电缆导体最大温度

分别为 90.56℃和 85.1℃。又看土壤温度分布规律,土壤温度随土壤深度而降低,上边界平均温度为 30℃,下边界平均温度为 20℃,符合左右壁面边界为恒流边界的条件,即与等式(20)相符合。此时隧道内空气的平均温度为 33.26℃。

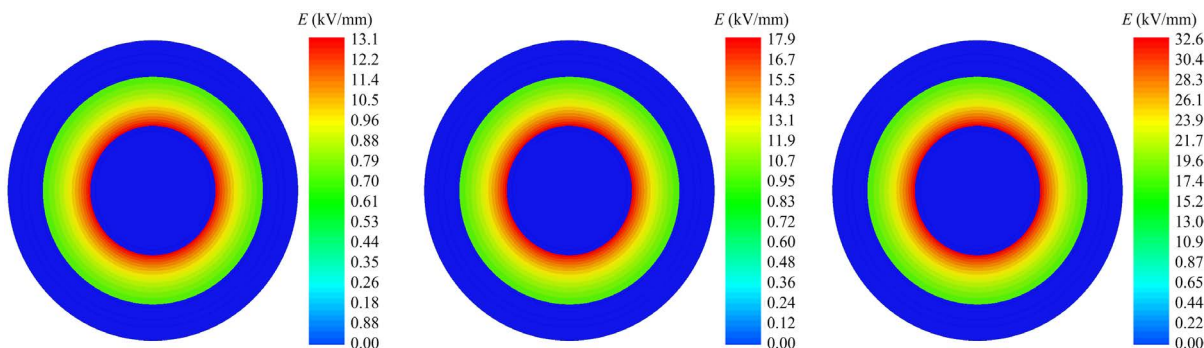


Figure 3. Distribution of electric field of 110 kV, 220 kV and 500 kV cables
图 3. 110 kV、220 kV、500 kV 电缆电场分布

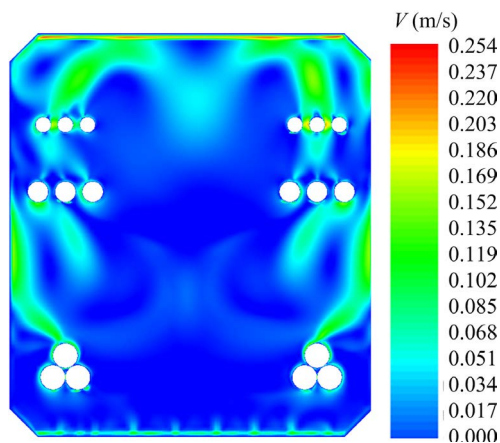


Figure 4. Air velocity distribution in cable tunnel
图 4. 电缆隧道内空气速度分布

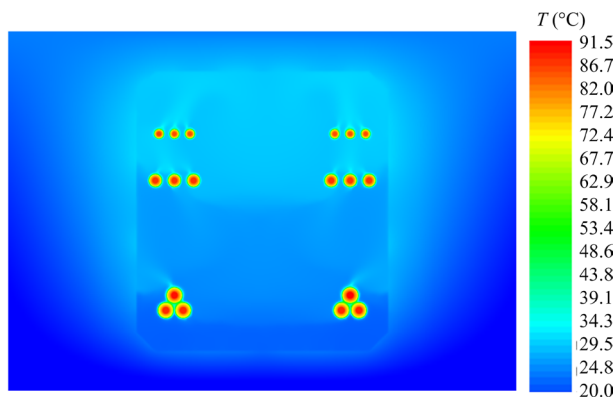


Figure 5. Cable tunnel temperature distribution
图 5. 电缆隧道温度分布

图 6 为各层电缆温度分布云图,从图中可看出,500 kV 电缆导体温度最大,达到 91.5℃,且下面两相导体温度相对上面一相导体较低,原因是热空气向上流动,冷空气向下流动导致。“一”字型敷设电

缆中间相的导体温度比两侧导体温度高，原因一是中间相电缆温度受左右两相电缆温度的影响，其散热效果较差，原因二是电磁感应的邻近效应，中间相导体受另外两电缆的交变磁场影响较大。110 kV 和 220 kV 中间相导体最高温度分别为 85.1℃ 和 90.56℃。

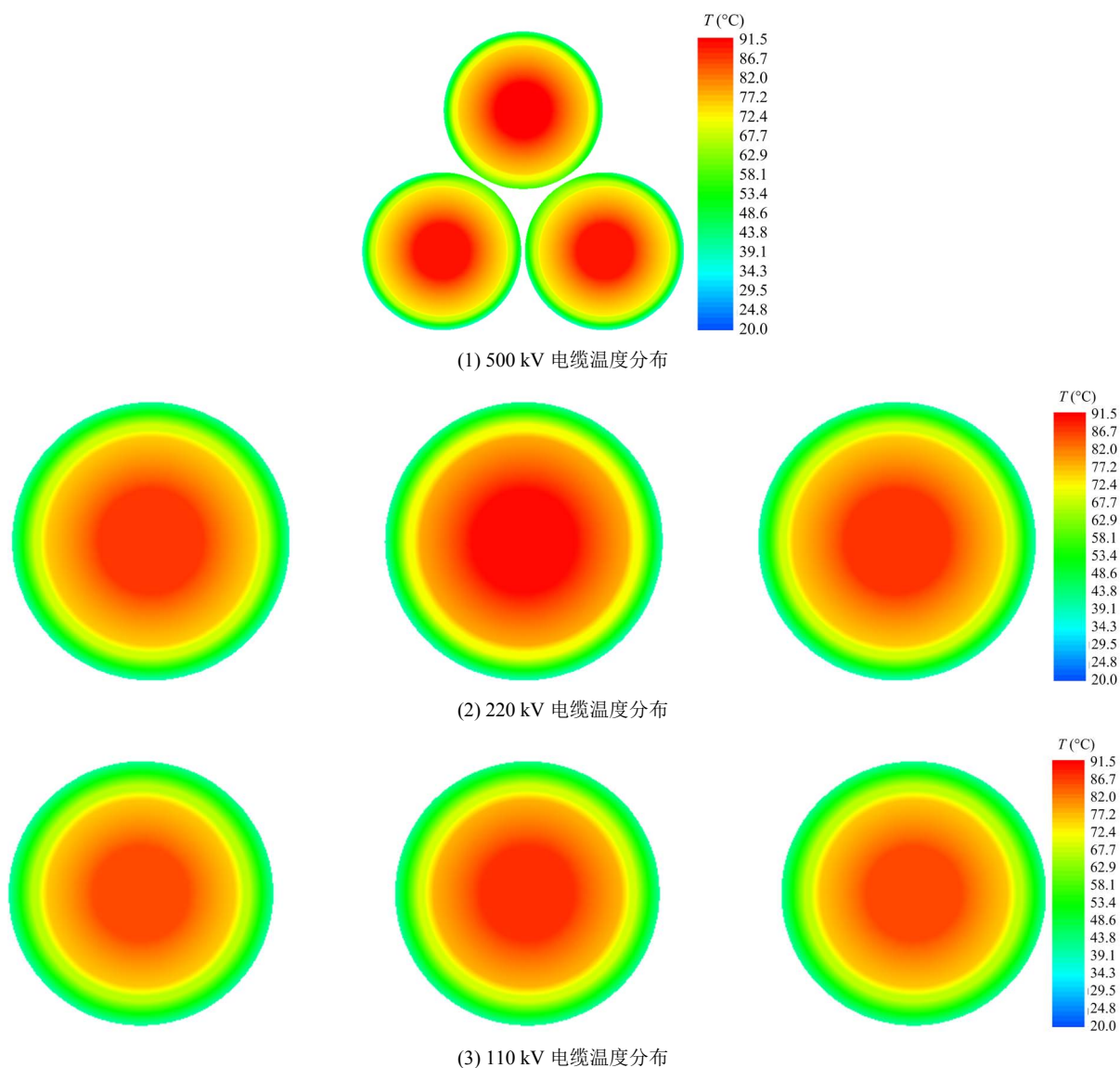


Figure 6. Temperature distribution of each layer of cables

图 6. 各层电缆温度分布

电缆正常运行时，一般不会超过额定电流，为了对比各层电缆在正常运行状态下导体温度分布情况，设 110 kV 电缆通入 1000 A、220 kV 电缆通入 1400 A、500 kV 电缆通入 1600 A，对比分析各层电缆温度大小。图 7 为各层电缆最高温度相的径向温度，从图中可看出，110 kV 电缆导体温度为 74.2℃，220 kV 电缆导体温度为 76.7℃，500 kV 电缆导体温度为 80.6℃。500 kV 电缆导体温度比 220 kV 电缆导体温度高 3.9℃，220 kV 电缆导体温度比 110 kV 电缆导体温度高 2.5℃。原因是虽然导体电缆导体截面积增加了，但是电缆的载流量也增加了，电缆载流量增加导致的温度上升程度大于导体截面积增加的散热程度。

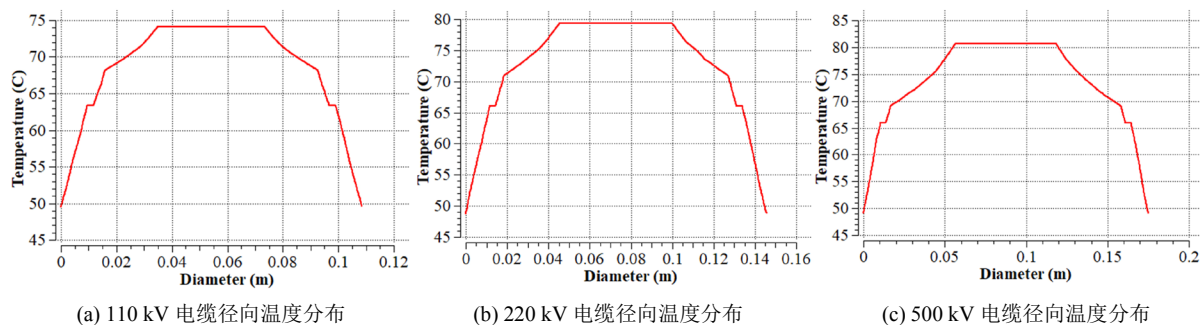


Figure 7. Radial temperature distribution of each cable

图 7. 各电缆径向温度分布

5. 结论

本文基于 ANSYS 有限元仿真软件, 建立了多回路、不同电压等级电缆隧道电磁-热-流耦合仿真模型, 研究电缆隧道内空气温度及各电缆电场和温度分布情况。得出结论如下:

1) 110 kV、220 kV、500 kV 电缆绝缘最大场强分别为 13.18/17.95/32.67 kV/cm, 与解析法相比, 误差均在 3%以内。

2) 采用“一”字型敷设时, 中间相电缆温度较两侧相高, 采用“品”字型敷设时, 上方一相电缆温度较下方两相高。

3) 电缆隧道内电缆的散热与空气的流动有关, 温度梯度越大的地方流速越大, 且流速分布云图和温度分布云图具有相似性。

致 谢

本论文工作得到了中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司项目(多回电缆线路隧道温度场分析及载流量计算研究, 40-1A-KY201819-D301)的支持。

参考文献

- [1] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 袁园. 电缆沟敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 24-29.
- [2] 张洪麟, 唐军, 陈伟根, 王有元. 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.
- [3] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 张冠军. 电力电缆载流量计算的研究与发展[J]. 电线电缆, 2010(2): 4-9.
- [4] Anders, G.J., Chaaban, M., Bedard, N. and Ganton, R.W.D. (2007) New Approach to Ampacity Evaluation of Cables in Ducts Using Finite Element Technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2, 969-975. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308208>
- [5] 孟凡凤, 李香龙, 徐燕飞, 梁永春, 李彦明, 李忠魁. 地下直埋电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 绝缘材料, 2006, 39(4): 59-61.
- [6] 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.
- [7] 李巍巍, 等. 隧道电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(5): 55-59.
- [8] 郑文坚. 空气敷设电缆热-流耦合场仿真及其参数研究[D]:[硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [9] Del Pino Lopez, J.C. and Romero, P.C. (2011) Influence of Different Types of Magnetic Shields on the Thermal Behavior and Ampacity of Underground Power Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 2659-2667. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2158593>