

DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.027

地下电力电缆群敷设水冷管道模型的研究

郑雁翎¹, 李维新¹, 冯元¹, 王亚云¹, 仪涛²

(1. 宝鸡文理学院电子电气工程系, 陕西 宝鸡 721016; 2. 江苏省电力设计院, 南京 210002)

摘要: 随着城市用电负荷需求的日益增大,采取适当的措施提高电缆群的载流能力有重要研究意义。文中主要研究了在电缆群中敷设水冷管道这种增容方式,即水冷管道中对流换热带走电缆群产生的热量,使得电缆群区域降温,从而提高电缆群载流量。首先建立电缆群敷设水冷管道模型,然后对水流体的流动因素进行有限元分析,并计算载流量,从而验证这种方法对提升电缆载流量的效果。通过Ansys仿真计算的结果数据可知,对于水冷管道模型,水流温度及流速是影响电缆群载流量提升效果的主因,其改善电缆群的散热效果。电缆群载流量的提高可达28%。

关键词: 电力电缆; 排管敷设; 载流量; 水冷管道模型; 有限元数值算法

Research on Water-cooled Pipe Model of Underground Power Cable Groups

ZHENG Yanling¹, LI Weixin¹, FENG Yuan¹, WANG Yayun¹, YI Tao²

(1. Department of Electronic and Electrical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Shaanxi Baoji 721007, China; 2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the increasing of power load in the city, it is important to take appropriate measures to improve the carrying capacity of cable group. In this paper, we mainly explore this method of cable water-cooled pipe laying for capacity increasing. For water-cooled model, the heat generated by power cable groups is taken away by the convective heat transfer in water-cooled pipe, so that the environment temperature of cable groups decreases, therefore, it is a feasible and effective method to exploring cable transmission capacity of cable group. The theoretical models of underground power cable groups with water-cooled pipe is established, then the flow factors of aqueous fluid in water-cooled pipe analyzed by using FEM, and ampacity for cable groups are calculated, thus the accuracy of the models is verified through experiments and the comparison with previous research results. These result of calculation on cable groups ampacity by Ansys indicate that water temperature and velocity have a great impact on cooling effect, and it can improves the heat dissipation effect of the cable groups, thus the total ampacity of cable groups is significantly improved to almost 28% for aqueous fluid in water-cooled pipe.

Key words: power cable; pipe laying; ampacity; water-cooled model; FEM

0 引言

随着城市用电负荷的日益增大,采取何种适当的措施用于提高电缆群载流能力有着重要的意义,

这也是进行电缆群载流量研究的一个主要目的^[1]。为了提高电缆利用效率及满足部分地区对电缆载流量的更高需求,在英国,大约16%的电缆输电线路都使用强制风冷或管道风冷的方式。据有关资料分析^[2],在隧道敷设的情况下,同时敷设水冷管道或使

收稿日期:2017-09-10; 修回日期:2017-11-13

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目资助(14JK1042);宝鸡市科技计划项目(16RKX1-6);宝鸡文理学院院级重点研究项目(2018066)。

Project Supported by Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department(14JK1042), Science and Technology Planning Project in Baoji, Shaanxi Province(16RKX1-6), the Key Research Project of Baoji University of Arts and Sciences(2018066).

用强制通风措施,可大幅提高电缆群载流能力,有明显的经济效益。在国内,对电缆使用强制水冷及风冷措施提高电缆群载流量的研究较少,此措施也没有在国内普及使用,所以研究该方式下电缆群温度场分布及对载流量的影响,对于普及该敷设方式有重要意义。

对排管敷设电缆群温度场分布结果分析的基础上^[3-6],考虑在电缆群中敷设水冷管道,利用的是对流换热原理,即水冷管道中流动的水可带走运行电缆群产生的热量,局部降低水冷管道附近区域电缆的温度,从而达到提高电缆群载流量的目的。利用有限元数值算法建立电缆群敷设水冷管道模型,分析水冷方式对电缆群载流量的影响,为以后水冷方式的普及提供一些参考

文中的内容将利用有限元数值算法建立电缆群敷设水冷管道模型,并进行仿真计算,考察水冷方式对电缆群载流量的影响,通过试验以及与相关研究成果的对比^[7-11],验证理论模型的准确性。最后对比不采用水冷管道方式电缆群载流量,分析水冷管道模型对电缆群载流量的提升效果,以及影响这种方法使用效果的因素。为以后水冷方式的普及提供一些参考。

1 电缆群敷设水冷管道数值计算模型

考虑到高压电缆电磁感应的影响,因而水冷管道采用PE管,水冷管内径为50 mm,可忽略水冷管厚度,对于传热效果影响不大^[12]。水冷管道模型能提高电缆载流量是因为水冷管道中流动的水带走电缆产生的热量,局部降低水冷管道附近区域的温度。在传热学中^[13],水流带走热量这一物理过程叫做水冷管壁与水流之间的对流换热过程。对流换热过程的强弱程度通过对流换热系数来表征,对流换热系数的计算有成熟的经验公式可供利用,如式(1)所示。

$$h = \frac{q}{(T_s - T_b)} = \frac{Nu \times k}{D} \quad (1)$$

式(1)中: h 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_s 为管壁温度, K ; T_b 为管内流体温度, K ; q 为热流密度, W/m^2 ; k 为流体的热传导系数, $W/(m \cdot K)$; D 为特征尺寸,在该情况下指水管的内径, m ; Nu 为努塞尔数,是一个反映对流传热强弱的无量纲数。对于特定的流体,努塞尔数跟流体的雷诺数和普朗特数有关^[14]。

对于研究的水冷管道模型,流体的努塞尔数可通过下列各式求取:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \times (Re - 1000) \times Pr}{1 + \left(12.7 \times \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}\right) (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2)$$

$$f = 0.3164 \times Re^{-0.25} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (5)$$

式(2)-(5)中: Re 为雷诺数,是在流体运动中惯性力对黏滞力比值的无量纲数; Pr 为普朗特数,无量纲数; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为动力粘性系数, $Pa \cdot s$; v 为流场的特征速度 m/s , L 为特征长度, m ; γ 为运动粘度, m^2/s ; α 为热扩散系数, m^2/s 。

通过式(3)-(5),可确定特定流体的努塞尔数,然后代入式(1),即可求得管壁和流体的对流换热系数。

2 计算实例分析

将3根110 kV-800YJY型交联聚乙烯电力电缆直埋在土壤中,导体线芯为紧压圆形绞合导体,为便于计算,电缆简化为3层结构,导体层、绝缘层和外护层^[15-16],共布置4根水冷管,在3根电缆上方均匀分布。水冷管道内水流速度 $v=2 m/s$,水流温度为20℃。敷设模型见图1。



图1 电缆及水冷管敷设示意图

Fig. 1 The model of cables with water-cooled pipes

2.1 计算参数

计算流体的雷诺数

$$Re = \rho \times v \times L / \mu =$$

$$1000 \times 2 \times 0.05 / (1.01 \times 10^{-3}) = 99010$$

计算流体努塞尔数

$$Pr \text{ 是水的普朗特数, } Pr = 7; Nu = 589.5.$$

将努塞尔数代入对流换热系数公式可得

$$h = Nu \times k / D = 589.5 \times 0.6 / 0.05 = 7074.3 W/(m^2 \cdot K)$$

其中: k 是水的热传导系数, $k=0.6$; D 是水管特征尺寸,即水管内径, $D=0.05$ 。

计算地下电缆群温度场时,一般取土壤表面对流换热系数值为 $10 W/(m^2 \cdot K)$,水冷管道管壁的对

流系数值为 $7\,074.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 远大于 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 说明管壁与水流之间的换热作用很显著, 能显著降低电缆群周围温度。

2.2 施加边界条件

1) 上边界施加空气对流边界条件, 对流换热系数为 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 空气温度设为 $25\text{ }^\circ\text{C}$;

2) 左右边界为绝热边界条件;

3) 下边界为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 的土壤温度边界;

4) 4个水管壁上施加流体对流换热边界, 对流换热系数为 $7\,074.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 水流温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

流体在电缆周围流动过程中, 要带走电缆产生的热量, 水流温升公式为

$$\Delta T = \frac{V_c(W_c + W_s + W_d)}{f_c C_p m_c} \quad (6)$$

式(6)中: V_c 为水流的体积; W_c 、 W_d 、 W_s 分别是导体的焦耳损耗、介质损耗和金属屏蔽损耗, 即发热源; f_c 为水流的体积流动速率 (m^3/s); C_p 为水流的比热容; m_c 为水流系统的总质量。

流体在电缆周围流动过程中, 以 1 km 水冷管中的水流体为研究对象, 1 km 的电缆作为发热源, 假设电缆中产生的热量全部被水流体吸收, 水流温升公式计算可得: 水的温升为 $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。该温升是单位时间内 1 km 电缆导致的水流的温升, 同时水流循环时, 与外界有换热的过程, 所以在温度场分析时, 可以假定水流体温度是不变的。

假设3根单芯电缆通有 $1\,000\text{ A}$ 的三相电流, 在边界条件和载荷确定以后, 对温度场区域划分网格, 用有限元数值算法求得电缆群区域温度场分布情况见图2。直埋土壤中的电缆群温度场见图3。

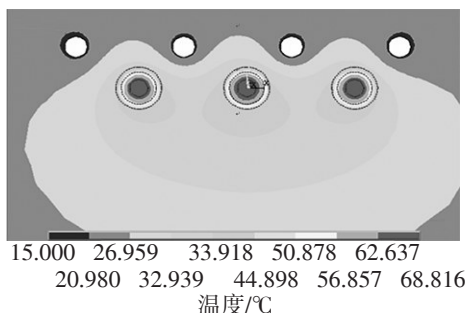


图2 有水冷管时电缆区域温度场分布图

Fig. 2 The thermal field of cables with water-cooled pipes

从图2可知, 有水冷管道时, 温度场最高温度是 $68\text{ }^\circ\text{C}$; 无水冷管道时, 温度场最高温度为 $109\text{ }^\circ\text{C}$, 水冷管道降温作用明显, 水冷管道周围区域温度跟水流温度相当, 电缆群附近区域温度也有明显降低。

为进一步验证水冷管道对提高电缆群载流量的作用, 运用迭代算法, 以电缆群温度场区域最高温度不超过 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 为迭代判据, 计算两种情况下电缆群的

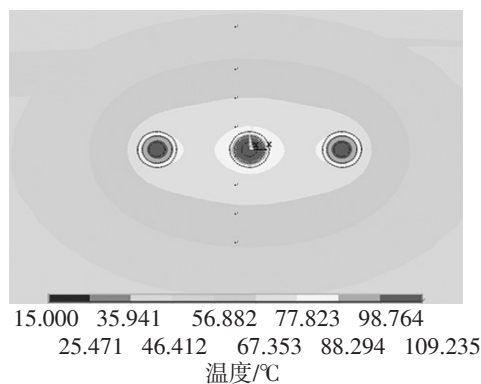


图3 直埋电缆区域温度场分布图

Fig. 3 The thermal field of buried cables

载流量: 有水冷管道敷设时电缆载流量为 $1\,196\text{ A}$; 无水冷管道时电缆载流量为 884.5 A 。可见, 有水冷管道时电缆载流量比无水冷管道时有大幅提升。

3 水冷管道对电缆群载流量的提升分析

当电缆群中电缆根数较多时, 由于电缆相互热影响的作用, 每根电缆载流量与该电缆单根敷设时相比, 下降幅度较大, 依据以上水冷管道模型提升电缆载流量的结果, 在电缆群中敷设水冷管道来提高电缆群载流量, 并研究分析电缆群温度场及载流量的变化情况。

以4行5列排管敷设电缆群为例, 排管敷设间距是 240 mm , 电缆类型 $\text{YJV22-8.7/10 kV-3}\times 300$, 4行5列共19根电缆, 19个回路, 中间一根排管是通讯管位, 土壤温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 空气温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 见图4。

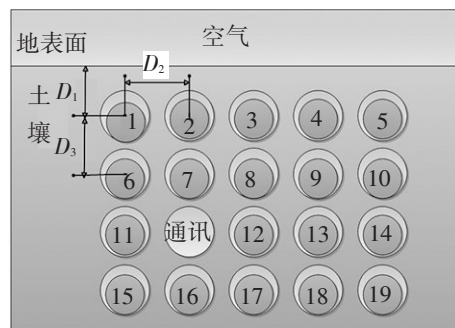


图4 电缆群敷设示意图

Fig. 4 The model of power cable groups laying

对电缆群载流量进行优化计算^[17-20]: 即当所有运行中的电缆最高工作温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 求得该电缆群总载流量最大值。电缆群电流值的分布情况见表1。

从表1可知, 电缆群总载流量为 $4\,996\text{ A}$ 。由于电缆群中电缆根数较多, 电缆间相互热影响作用明显, 部分管位电缆载流量与空气中或土壤中单根直埋的情况相比, 下降较多, 导致电缆利用率较低。为解决该问题, 考虑在排管群的部分管位中敷设水冷

表1 电缆群载流量

Table 1 The ampacity of power cable groups A

分布情况	1列	2列	3列	4列	5列
1行	337	298	273	284	336
2行	295	247	238	233	274
3行	256	通信	202	198	243
4行	297	243	224	233	285

管道,其中敷设示意图见图5。

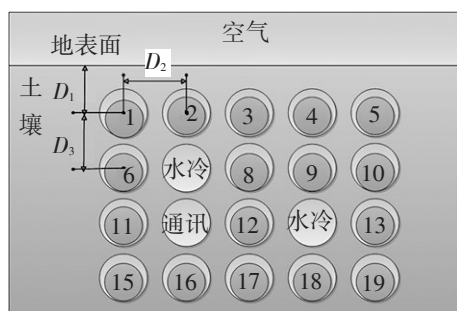


图5 有水冷管的电缆群敷设示意图

Fig. 5 The model of cable groups with water-cooled

该敷设方式下电缆群最优化电流分布情况见表2。

表2 有水冷管时电缆群电流值

Table 2 The ampacity of cable groups with

water-cooled pipes					A
分布情况	1列	2列	3列	4列	5列
1行	441	442	453	406	383
2行	482	水冷	457	458	383
3行	397	通讯	461	水冷	462
4行	402	405	382	451	448

从表2结果可知,电缆群总载流量为7 313 A。由于水冷管道的散热作用,地下电缆群载流量有大幅度的提高,并且该值接近标准内在空气中电缆的额定载流量,可见水冷管道的作用是相当显著的,相对表1的总载流量提高约46%。

为进一步验证水冷管道的作用,当敷设水冷管道的位置空置时,利用最优化算法得到电流分布见表3。

表3 无水冷管时电缆群电流优化结果分布表

Table 3 The ampacity of cable groups without

water-cooled pipes					A
分布情况	1列	2列	3列	4列	5列
1行	331	323	313	337	329
2行	325	空置	258	262	314
3行	311	通讯	276	空置	306
4行	324	313	257	298	301

在没有冷水管道时,电缆群总载流量为5 718 A。载流量提高约27%。可见,有无水冷管道两种情况

下,每根电缆载流量差异明显,进一步验证水冷管道对提升电缆载流量有显著效果。

4 结语

提高电缆群载流能力是进行电缆载流量研究的主要目的,文中主要研究了敷设水冷管道提升电缆群载流量的方法。通过分析对电缆群敷设水冷管道模型分析,可知水流温度及流速是影响散热效果的主因,通过与不采用水冷管道方式电缆群载流量对比,水冷管道模型对电缆群载流量的有着明显提升效果,约28%。因而,对于大规模电缆群线路,在电缆群中间敷设水冷管道可以大幅提升电缆群载流能力。在实际应用中,要综合考虑载流量提升效果和经济性的要求,合理确定水冷管道的所用材质,布置位置及尺寸等。

参考文献:

- [1] 郑雁翎. 10 kV XLPE 电力电缆稳态温度场和额定载流量的计算[J]. 宝鸡文理学院学报, 2009, 29(2): 59-62. ZHENG Yanling. The calculation of the steady-state temperature field and ampacity of 10 kV XLPE cables [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), 2009, 29(2): 59-62.
- [2] SWAFFIELD D J, LEWIN P L, LEBLANC M, et al. A comparison between 2-D isothermal region matrix and finite element analysis cable rating methods for water cooled circuits[J]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006, 38(2): 490-493.
- [3] 郑雁翎, 仪涛, 张冠军, 等. 分散式排管敷设电缆群温度场的流固耦合计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 763-768. ZHENG Yanling, YI Tao, ZHANG Guanjuan, et al. Fluid-solid coupling computation on temperature field of decentralized pipe cable system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 763-768.
- [4] 梁永春, 王忠杰, 刘建业, 等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 763-768. LIANG Yongchun, WANG Zhongjie, LIU Jianye, et al. Numerical calculation of temperature field and ampacity of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 763-768.
- [5] 郑雁翎, 仪涛, 张冠军, 等. 10 kV 地下排管敷设电缆的分布式光纤在线测温[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 49-52. ZHENG Yanling, YI Tao, ZHANG Guanjuan, et al. On-line temperature monitoring of 10 kV underground cables-in-pipe row based on distributed optical fiber

- sensing technology[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10):49-52.
- [6] 于建立, 隋琳琳, 田际平, 等. 预埋管电缆载流量的有限容积法计算和分析[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(3):43-46.
YU Jianli, SUI Linlin, TIAN Jiping, et al. Calculation and analysis of cable ampacity lay in pipe based on FVM[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2013, 33(3):43-46.
- [7] 赵继光, 牛海清, 陈 诚, 等. 直埋集群敷设配电缆的载流量多回路修正系数校核[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1):89-93.
ZHAO Jiguang, NIU Haiqing, CHEN Cheng, et al. Check of rating correction factor for direct-buried multi-circuit distribution cables in cluster laying[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1):89-93.
- [8] Calculation of the current rating of electric cables, Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 1: General: IEC 60287-1-1:1994[S].1994.
- [9] Electric cables-calculation of the current rating-Part 2-1: Thermal resistance; Calculation of thermal resistance; Amendment 2: IEC 60287-2-1 AMD 1—2006 [S].2006.
- [10] 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.
- [11] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术, 2009, 34(12):3086-3092.
WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of static temperature field of buried cable based on FEM and analysis of influential factors [J]. High Voltage Engineering, 2009, 34(12):3086-3092.
- [12] PILGRIM J A, SWAFFIELD D J, LEWIN P L, et al. Assessment of the impact of joint bays on the ampacity of high-voltage cable circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1029-1036.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:274-294.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:274-294.
- [14] ZHOU G D, SHEN Y F. A new method to calculate the temperature field-virtual heat source[J]. Mechanics and Practice, 1993, 15(5): 49-53.
- [15] 梁永春, 李彦明, 柴进爱. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):185-190.
LIANG Yongchun, LI Yanming, CHAI Jin'ai. A new method to calculate the steady-state temperature field and ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2007, 22(8): 185-190.
- [16] 郑雁翎, 许志亮, 张冠军, 等. 采用MATLAB仿真的变电站高压进线温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(3):566-572.
ZHENG Yanling, XU Zhiliang, ZHANG Guanjuan, et al. Numerical calculation of static temperature field of underground pipe cables based on MATLAB[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3):566-572.
- [17] 郑雁翎. 电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11):3760-3765.
ZHENG Yanling. Research on optimal numerical calculation model of cable groups ampacity in cable route[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3760-3765.
- [18] 樊友兵, 赵健康, 钱 康, 等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2607-2612.
FAN Youbing, ZHAO Jiankang, QIAN Kang, et al. Analysis and optimization for operation of the single-core power cables in parallel[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2607-2612.
- [19] 鲁志伟, 葛丽婷, 张桂兰, 等. 地下电缆集群的优化运行[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2557-2561.
LU Zhiwei, GE Liting, ZHANG Guilin, et al. Optimal operation of underground power cable in cluster laying [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2557-2561.
- [20] 黄新波. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2013:169-194.
HUANG Xinbo. Transmission-line monitoring faultdiagnosis[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013:169-194.

郑雁翎(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力设备在线监测等方面的研究。