

基于有限元法的电缆温度场与载流量分析

戚家伟

(国网河南省电力公司客户服务中心, 郑州 450000)

摘 要:作为对于输电及配电系统都极其重要的设备之一,电力电缆具有不影响城市市容和传输可靠性高的特点。大量复杂的参数决定电缆的载流量,仅按照 IEC 60287-2-1—2015《电力电缆的额定电流计算》标准确定电缆载流量往往有较大的误差,无法满足实际需要。通过有限元法利用电缆温度分布来得到电力电缆的载流量,并通过 COMSOL 软件试验和仿真验证了此方法的正确性和有效性,给出了对电缆敷设有益及提高电缆载流量的建议。同时,证明此方法对电力电缆的安全、经济运行具有实际意义。

关键词:电力电缆;有限元法;载流量;COMSOL 软件

中图分类号:TM 757 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2018)12-0036-03

1 研究背景

如今,随着许多国家地下电缆生产和应用的迅速发展。从发电厂到城乡电网,从变电站到工厂和街道,地下电缆以其独特的特点得到越来越广泛的应用。电缆在很多情况下相对于架空线方面有着很大的优势。架空线是裸导线,而裸导线的载流量取决于空气和绝缘体。电力电缆比架空线电缆结构更复杂,除了导体,它有绝缘层来承受高压。电力电缆可以铺设在地面、不同种类电缆如图 1 所示。



图 1 不同种类的电缆

2 研究目的

本文主要通过 COMSOL 软件研究不同类型的电缆在不同参数条件下的温度场与载流量。首先,利用 COMSOL 软件画出电缆的几何参数;接下来通过参数的变换构建各种不同的土壤环境;最终通过仿真得到温度场分布与载流量给出增加载流量和减

少电缆成本的建议。

3 研究方法

3.1 COMSOL 软件的热传导模块

COMSOL 是一款基于偏微分方程的多元物理模型软件,它起源于 MATLAB 软件的工具箱模块,自 2005 年正式更名为 COMSOL。它利用有限元法^[1]通过求解偏微分方程来实现对物理现象的仿真模拟,热传导模块将用来模拟在不同环境条件下电力电缆的温度场分布及载流量。

3.2 温度场模拟的复杂性

由于影响温度场^[2]的参数较多,只能通过确定电缆的几何参数、电缆材料参数、不同环境的边界条件、网格划分及热源的位置来仿真电力电缆在不同环境下的载流量分析。

3.3 仿真分析流程

仿真的全过程如图 2 所示,首先利用软件设置电缆的几何参数,选择导体的材料和其他环境参数,接着对这个模型进行仿真模拟得到区域内的温度场分布,如果温度达到设定值,结果可以直接进行讨论与分析,如果达不到就通过改变负荷来改变温度直到达到设定值,最后根据得到的结果来给出提高电缆载流量的建议。

4 构建简化电缆模型

经查询得到,11 kV 300 mm² 聚乙烯铜铠装电缆^[3]的各项参数见表 1。

如图 3 所示,电缆实际模型与简化模型的大小相同,只有电缆的层数不同,而试验也可得知在两者都通过最大载流量时温度同为 91 ℃,简化层相当于其他各层不同材料的等效层,因此在试验中利用简

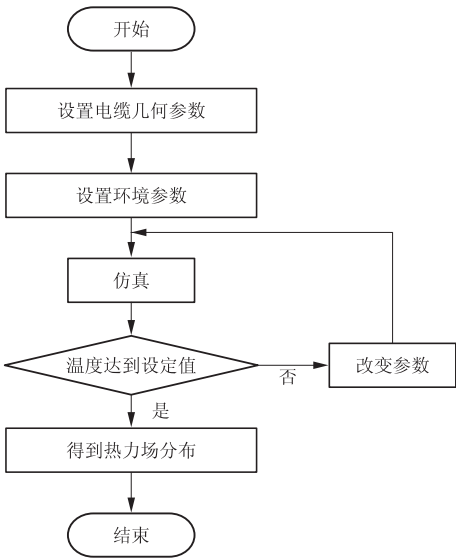


图 2 仿真分析流程

化模型可以大大降低模型建立时的复杂程度。

5 电缆温度与载流量的仿真模拟

5.1 电缆穿越水泥路面的仿真模拟

在这一部分,使用 11 kV 300 mm² 聚乙烯铜铝装电缆来进行研究。首先构建 30 cm 的水泥路面层,在其下方为 30 cm 的砾石层,而在砾石层下方为正常的土壤。接下来根据设定^[4] 电缆与砾石层的最小距离为 0.75 m,建立如图 4 所示的单根电缆简化模型并设定路面温度、热源、边界条件及其他参数。最终运行仿真对比不同环境条件下的结果。

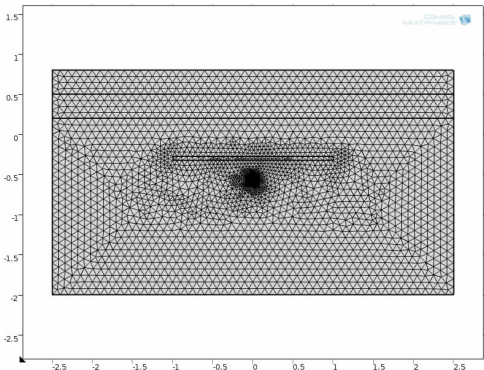


图 4 电缆穿越水泥路面的几何图形与网格划分

由于水泥的热容远远高于土壤与空气,当路面处于暴晒的情况下地表温度可以达到 50 ~ 60 ℃,接下来通过仿真来获得不同地表温度及无水泥里面、在电缆上方放置钢板情况下的载流量。

如图 5 所示,首先在同为 15 ℃ 的情况下,铺装水泥路面和不铺装水泥路面在电流较小时温度几乎相等,随着电流的增加,铺装水泥路面下的电缆温度要高于不铺装的情况而且两者的差距随着电流的增加越来越大。其次,在同为铺装水泥路面的 3 种不同地表温度的情况下,3 条曲线的增长趋势几乎相同只是最低温度随着电表温度的变化而变化。因此可以都得到结论:在地表温度相同、通过电流也相同的情况下,在水泥路面下铺装的电缆最高温度要高于上方无水泥路面的情况。为了解决这一问题,一般将钢板或者铝板放置在电缆与水泥路之间来增强

表 1 实际模型与简化模型的参数对比

项目	实际模型					简化模型		
	导体(铜)	绝缘层 (聚乙烯)	隔离套 (聚氯乙烯)	铝装 + 外护套 (+ 聚氯乙烯)	土壤	导体(铜)	简化层	土壤
热导率/[W · (m · K) ⁻¹]	0.25	0.25	230.00	0.63	0.63	400.00	0.27	0.63
热容/[J · (kg · K) ⁻¹]		2302.7	1050.0	897.0	800.0		2302.0	800.0
掩埋深度/m					0.8			0.8

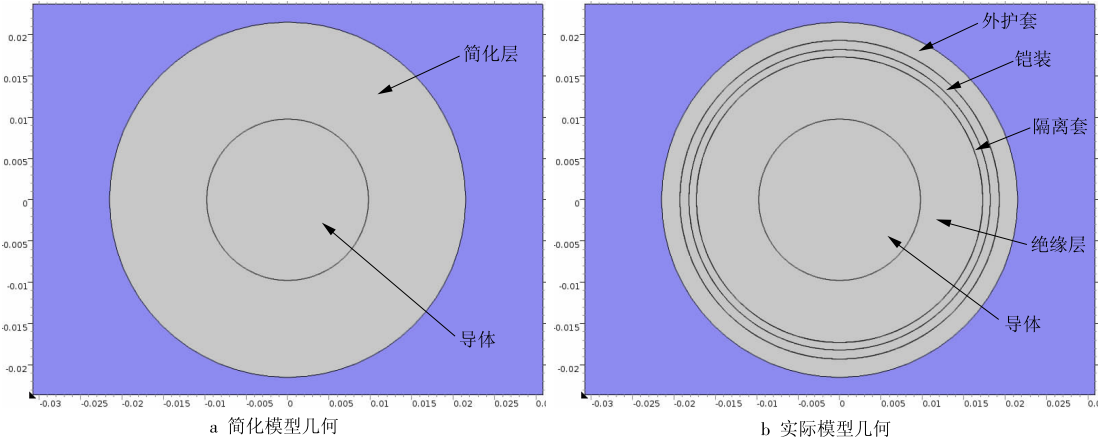


图 3 11 kV 电缆简化模型与实际模型几何对比

散热效果,因为金属的热导率要远远高于土壤且易于导热。

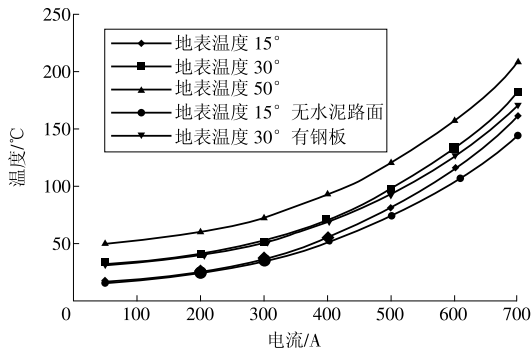


图 5 不同情况下电缆温度与通过电流的关系

对比同为 30 °C 的 2 条曲线可以看出,在 400 A 电流以下两者的最高温度几乎相同,但是当电流大于 400 A 后有钢板的电缆温度会明显低于无钢板的情况。当通过电流为 700 A 时,30 °C 有钢板的电缆温度只比 15 °C 无钢板的电缆温度高 3 °C。因此,在水泥路面和电缆之间安装一块钢板或者铝板能增强土壤的导热性和电缆的散热,进而提高了电缆输送电能的稳定性。

5.2 电缆的暂态仿真模拟

在现实生活与工作中,由于土壤、天气等多种原因,电缆不可避免地会出现故障^[4],由于电缆掩埋在土壤之中,一旦出现故障,故障点的检测将比较费时因为需要挖掘才能确定故障点。因此,一般情况下载故障找到之前电缆将在故障的情况下运行,而故障电流相对于非故障情况下的运行电流会大很多,在此期间电缆的温度会远远高于电缆的最大工作温度^[5]。

5.2.1 建立暂态模型

在这部分依然选择 11 kV 300 mm² 聚乙烯铜铠装电缆,不同于前面的稳态分析,暂态情况下电流会在故障发生时有突变,需要在 COMSOL 软件中选择时间模块创建一个阶跃电流代替恒定电流来进行仿真模拟。在阶跃参数的设置时,故障发生前电流为 280 A,发生故障瞬间电流为 560 A,而故障发生在 1 h 处,对于其他参数的设定例如材料、边界条件、几何参数与网格划分和前面的仿真相同。

5.2.2 暂态模型的仿真

对于 11 kV 300 mm² 聚乙烯铜铠装电缆,载流量为 560 A,在故障发生前电缆中通过电流为 280 A (载流量的一半),将电流阶跃设置在模拟的 1 h 处并阶跃至 560 A,因为土壤的热导率较小需要较长时间来进行热量传导,所以总的仿真时间为 40 h,接下来进行仿真并对结果分析。

模拟的总时间为 40 h,如图 6 所示,前 4 h 温度

随电流突变而发生的变化,图 7 则展现了整个模拟过程中电缆温度的变化情况,很明显地看出在电缆温度的增长率越来越低而最终温度无限接近电缆可达到最大工作温度 90 °C。当电流在 1 h 发生突变前,电缆温度稳定的增长,当发生故障后电流变为 560 A,电缆温度的增长量也陡然提升,在 1 ~ 2 h 之间温度增长量很大,而 2 h 时温度增长率因土壤的散热与电缆产生的热量趋于平衡而逐渐降低趋于稳定,故障状态与电流恒定 280 A,560 A 的温度曲线相比,故障状态与恒定 560 A 最终达到的温度相同只是 560 A 在前期的增长率较高,而恒定 280 A 的前 1 h 曲线与故障状态重合,达到的最终温度为 38 °C 比故障状态要低很多。

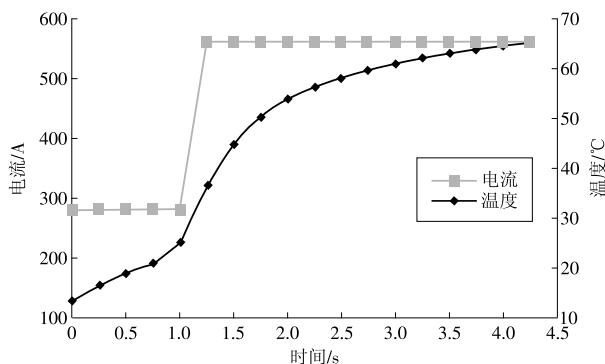


图 6 模拟 4 h 内电流与温度的关系

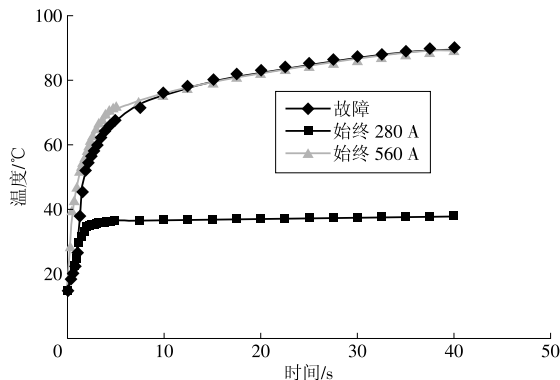


图 7 非故障与故障状态温度对比

5.3 提高地下电缆载流量的建议

基于对电缆各种情况的仿真模拟分析,可以通过改变电缆铺设条件来提高电缆载流量的结论,以下是提高载流量的几点建议。

(1)在满足技术规程的前提下尽量减小电缆的埋设深度。

(2)在电缆铺设时尽量远离外部热源。

(3)在电缆横跨水泥路面时在电缆与水泥路面之间安置钢板或者铝板来增加电缆的载流量。

6 结束语

本文主要利用有限元法 (COMSOL (下转第 41 页))

应满足起升机构小件物品检修的要求:如电动机维修时检修起吊装置应能够利用机房内的吊物孔将电动机吊置于大坝平台;机房的强度与刚度除应满足检修起吊装置起吊额定荷载安全外,还应承受非工作风压的要求。

常规门式启闭机机房一般多考虑功能要求,而较少考虑与周围环境协调与美观。对于河口村水库坝顶门式启闭机的机房,用户明确要求其外观设计必须与周围环境及建筑物的协调。为此,设备设计人员与建筑景观设计人员共同进行研究,并进行了多个外观设计方案的比较分析。

(1)常规外形机房及外刷混凝土颜色漆方案。机房为常规机房,内侧钢架,外侧钢板,四面墙壁呈平行四边形布置,相邻面相互垂直,顶部两个平面呈一定角度交叉布置,方便排水。为与周围环境及建筑物协调,机房外侧钢板涂混凝土颜色面漆。

(2)常规外形机房及彩板外铺锌板方案。机房结构同第 1 方案,外侧的钢板改为彩板外铺锌板。

(3)艺术机房及外刷混凝土颜色漆方案。机房在常规机房的前提下,将四面墙壁相交的直角升华为圆弧造型,其圆弧护板高度与机房顶平齐。艺术机房内侧钢架,外侧钢板,为增加其使用寿命,采用厚度为 4 mm 的钢板。

以上 3 种方案均可满足与周围环境颜色相协调的要求,但第 3 种方案,除颜色与周围环境协调外,机房四角圆弧形造型与坝顶固定卷扬启闭机机房建筑艺术造型一致,更好地满足了用户的景观需求(如图 2 所示)。

(上接第 38 页)软件)对电缆进行仿真模拟得到电缆的温度分布及载流量,通过对结果分析得到各种因素对电缆载流量的影响,主要建立电缆的实际与简化模型,解决了传统计算中对外部热阻难以确定的问题。研究各种不同外部环境下的电缆温度场分布及载流量,例如穿过水泥路面电缆及电缆的暂态分析,通过对温度场的分析给出降低电缆温度的有效建议。

通过本文的数据分析可以证明有限元法的正确性,但是这种方法也有局限性,今后还需要在以下几个方面对研究方法进行加强:一是只是建立了电缆直埋模型,并没有建立电缆沟及电缆排管模型;二是土壤的各项参数会随着深度而变化例如湿度,本文所有土壤的参数使用的是平均值,这 and 实际状态肯定会存在一些差距,将土壤的参数设置进行优化后会提高仿真结果的准确度。



图 2 河口村门机景观机房

5 结束语

河口村水库工程坝顶 2 000 kN 门式启闭机已通过型式试验,各项技术参数和强度、刚度及稳定性均满足规范要求,目前设备运行良好。对顺水流方向运行的单向门式启闭机,采用起升机构吊点中心与门式启闭机基距中心偏心布置形式,可有效减小吊点中心至一端建筑平台边缘的尺寸,从而减少土建工程量和投资。采用景观机房,可保持与周围建筑物的景观协调,达到设备、建筑物与周围环境的和谐,为今后水利工程同类门式启闭机的设计提供借鉴。

(本文责编:陆华)

作者简介:

史田明(1973—),男,江苏常州人,工程师,从事外协采购工作(E-mail:1071627177@qq.com)。

参考文献:

[1]陈守直,罗俊华. 电缆附近电场有限元计算方法[J]. 高电压技术,1996,22(3):14-15.
[2]王增强. 地下电缆温度场与载流量的数值模拟[D]. 石家庄:河北科技大学,2003.
[3]汪景璞,邹元传. 电缆材料[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
[4]WOLLASTON F O. Transient temperature phenomena of 3-conductor cables[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1949,68(2):1284-1297.
[5]OHATA K, SAKURAI S, ICHIYANAGI N, et al. Transient temperature rise of tunnel for power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990,5(2):745-752.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

戚家伟(1991—),男,河南郑州人,助理工程师,工学硕士,从事电力营销研究方面的工作(E-mail:84280864@qq.com)。