

单芯电缆实时载流量计算方法研究

李伟¹, 曾宏², 杨琳², 朱轲²

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610054; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要:以电缆温度在线监测为基础,结合实时负荷数据和温度信息,采用有限元方法,对单芯电缆温度场进行分析,实时计算地下电缆的温度场和载流量。该方法考虑了外部土壤热阻的实时计算和更新,用环境温度、表面温度和实时负荷来间接计算。实验表明:该方法能准确获取电缆温度场和实时载流量,对提高电缆运行可靠性和输电能力具有重要意义。

关键词:载流量实时计算; 表面温度; 温度场; 有限元法

Abstract: Based on on-line monitoring of cable temperature, and combined with real-time load data and temperature information, the temperature field of single-core cable is analyzed by using finite element method, which calculates the temperature field and carrying capacity of underground cable. The method takes the thermal resistance of the soil into account, which is calculated indirectly with ambient temperature, surface temperature and real-time load. The experiments show that cable temperature field and real-time carrying capacity can be obtained by the proposed method, which is of great significance in improving the operation reliability and transmission capacity of the cable.

Key words: real-time calculation of carrying capacity; surface temperature; temperature field; finite element method

中图分类号: TM751 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0061-04

0 引言

高压电力传输主要有两种方式: 地下电缆和架空线路。随着经济社会的不断发展, 电力电缆在电能传输中越来越重要。由于其成本高、投资大, 如何充分利用电缆的传输能力, 也得到了学术界的广泛关注。运行经验表明, 电缆的实际运行环境和环境温度绝大多数情况下比额定载流量假定的条件好很多, 未能充分利用电力电缆的传输能力。

目前, 35 kV 等级以上的电缆基本安装了电缆温度监测系统, 其中重要线路的高压/超高压电力电缆采用分布式光纤测温系统。利用这些温度监测系统, 可实时获取外护套表面温度来计算导体温度, 从而实时控制电缆的载流量^[1-4]。电缆敷设好后, 载流量的影响因素主要是环境温度、外部热阻和外部热源。外部热阻一直以来都是载流量准确计算的难点。基于 IEC 287 标准, 下面用环境温度、表面温度和负荷来间接实时计算外部热阻。在此基础上, 则提出了单芯电缆载流量的实时计算方法, 经与载流量试验数据比较, 验证了该方法的准确性。

1 外部土壤热阻的实时计算

对于地下敷设电缆, 土壤热阻系数一般采用分区域处理, 根据现场实测土壤方面的资料和一般经验来选择, 是一个静态值。实际上土壤热阻系数受温度、水分、气候等因素影响, 是随时间和空间变化的动态值。单芯电缆的稳态热路模型如图 1 所示。

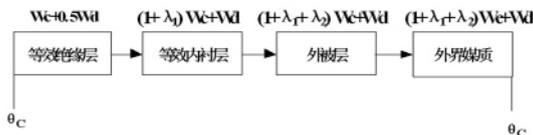


图1 单芯电缆稳态等效热路图

图中, θ_a 是外护套表面温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 是环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_4 为外界媒质热阻, $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$; λ_1 、 λ_2 分别为金属护套损耗、铠装损耗与导体损耗之比; W_c 、 W_d 分别为电缆单位长度导体损耗、介质损耗, J/m 。

由图 1 可得

$$\theta_a - \theta_0 = T_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2) W_c + W_d \quad (1)$$

介质损耗在运行中基本不变。由式 (1) 得到以下函数关系。

$$f(T_4) = \beta \times \frac{I^2}{(\theta_a - \theta_0) - W_d} \quad (2)$$

β 是一个常系数。 T_4 土壤热阻系数可由现场实测数据得到,作为标准值。式中参数均能测得,代入计算得到 β 值。结合实时获取的表面温度、环境温度和负荷大小,利用已知的 β ,重新计算 T_4 。电缆表面温度长期超过一定数值,土壤湿度或外部热源发生较大改变等情况,就会引起 T_4 计算值明显偏离。如果计算值与标准值的相对误差超过一定数值(比如5%),就用计算值或重新现场测取来更新 T_4 。

2 单芯电缆温度场和载流量实时计算方法

载流量实时计算就是求解电缆温度场的有限元方程,当导体温度达到最大允许温升时的负荷大小。实际运行中,实时负荷、环境温度、外部热阻等因素改变时,电缆温度场就由稳态温度场进入暂态温度场。暂态温度场计算涉及到电缆热容和内部热源的起始条件。根据稳态方程来求解得到初始条件后,在暂态过程中,每一个时刻计算出的热容值均作为下一时刻的起始条件,用迭代法求解。

2.1 暂态温度场的有限元方程

电缆温度变化的暂态过程必须考虑电缆结构材料中热容产生的吸、放热作用。热容的存在,使得导体的温升是经过热平衡才到达稳态。最受关注是导体温度。

有限元方程基于以下假设。

(1) 多芯扭绞导线等效为截面面积相等的单芯圆导线,电缆材料的热物性为常数;

(2) 热源发热均匀。

电缆暂态温度场属于含有内热源的二维导热,考虑电缆分布热容,其数学模型为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) = q_v \quad (3)$$

式中 ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$; T 为点 (x, y) 处的温度, K ; λ 为导热系数, $\omega/\text{m} \cdot \text{K}$; q_v 为体积生热率, ω/m^3 。

交流电力电缆的内热源主要是导体损耗、介质损耗、护套损耗和铠装损耗,根据文献[2]计算。结构参数根据厂家推荐值或采用相应产品国家标准中的规定值。

2.2 边界条件

热量通过热传导、对流和辐射等形式向外散发。根据传热学,边界条件可归结为三类^[5-7]。

$$T(x, y)|_{\Gamma} = f(t)|_{\Gamma} \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} + q_2 = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \quad (6)$$

式中 q_2 为热流密度, W/m^2 ; α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_f 为环境温度, K ; Γ 为积分边界。

暂态方程和边界条件都与时间有关。有限元计算就是将暂态过程离散为若干个时刻的连续,初始时刻的边界条件根据稳态温度场来确定,以后各时刻的边界条件为上一时刻的数值结果。计算时采用三角形单元,用交叉迭代法求解。当迭代收敛于 10^{-5} 时,认为“等于”解析值,终止迭代。

2.3 实时载流量计算方法

地下直埋方式时单芯电力电缆实时载流量计算流程如图2,采用迭加法,具体计算过程见流程图2。

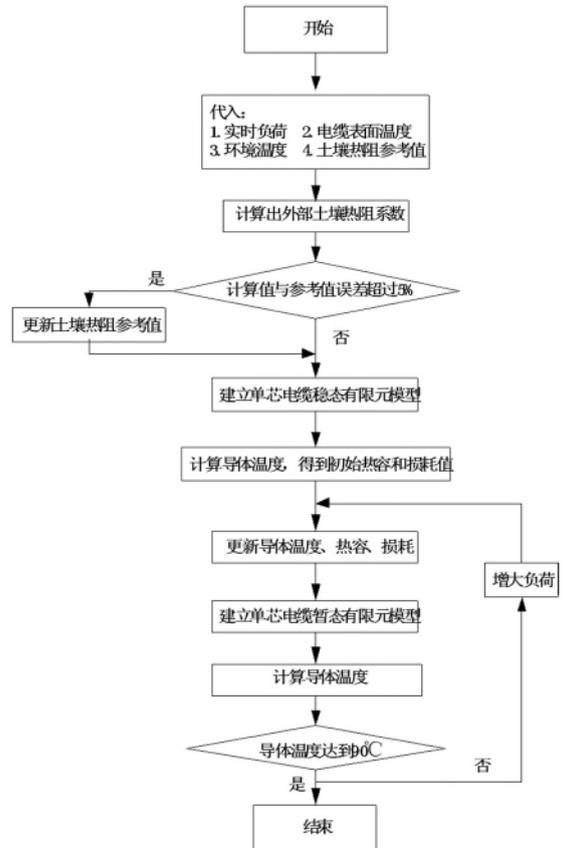


图2 地下直埋单芯电缆载流量实时计算流程图

1) 根据实时负荷、外护套表面温度和环境温度,计算实时土壤热阻系数,一旦与参考值的误差超过5%就更新土壤热阻系数。

2) 利用实时的土壤热阻系数和其他数据,用有限元计算得到稳态温度场分布、热容和损耗的初始条件。

- 3) 更新导体交流电阻、热容及损耗值。
- 4) 建立暂态温度场模型,将土壤热阻系数、环境温度、初始热容等参数代入暂态有限元方程中进行计算,得到导体温度。
- 5) 然后重复第三步,迭代直至导体温度达到90℃。此时的负荷就是实时载流量。

3 实验验证

3.1 电缆参数

选用35 kV YJLV 1×50 mm²交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆,铺设在空气中进行实验验证,电缆结构及热性能参数如表1。其中所取的主要参数如下:聚氯乙烯的热阻系数为3.5℃·m/W,交联聚乙烯的热阻系数为7℃·m/W,环境温度为7℃。对110 kV以下的电缆,焦耳热是主要的热源。由于电压等级较低,介质损耗较小,同时与大电流实验数据对比,这里不考虑介损。

表1 35 kV YJLV 电缆参数

	结构/mm	热容/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
导体直径	8.3	900
绝缘厚度	10.3	2 640
铜带屏蔽	1.0	385
外护套厚度	2.1	1 130
电缆外径	35.1	

将半导体层合并到绝缘层,电缆分为导体、绝缘层、铜带和外护套。采用三角形单元计算,在各层相邻处进行网格加细,以保证计算精度,一共5 072个单元数。

3.2 实验原理接线图

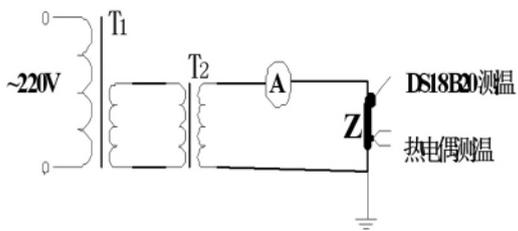


图3 实验原理接线图

图3中T1是调压变压器,T2是大电流变压器,A是钳形电流表,Z是电缆试样,热电偶对电缆导体测温,DS18B20对电缆护套表面温度测温。用电缆大电流加载装置给电缆加载150 A电流至稳态后,瞬间增至额定载流量200 A,利用热电偶监测电缆暂态过程中的温升变化。

3.3 实验结果及分析

在不同环境温度和外部散热条件下进行载流量实验。

(1) 环境温度恒定时负荷改变

实验进行中,环境温度在19.9~20.5℃变化,可忽略环境温度对载流量的影响。

对处于负荷为100 A稳态情况的电缆瞬间增大负荷至150 A。实验过程中用电缆温度测温装置测得表面温升曲线如图4所示,导体温升的实验值和计算值如图5所示。通过查询可知,表面温度从20.9℃缓慢上升到29.3℃,载流量曲线如图6。在实际环境温度20℃下,额定载流量为192 A。负荷即便超过了192 A,但是未达到实时计算的载流量,导体未超过允许温度,电缆仍然安全运行。通过导体温度计算值和实验值的比较,证明了暂态下提高电力电缆短时负荷来挖掘电力电缆输送潜力是可行的,尤其是对冬季环境温度低、电力需求大的北方,是能解决紧急情况下的电力调度问题。

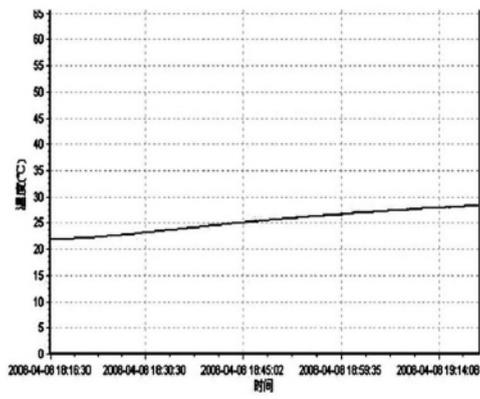


图4 表面温升曲线

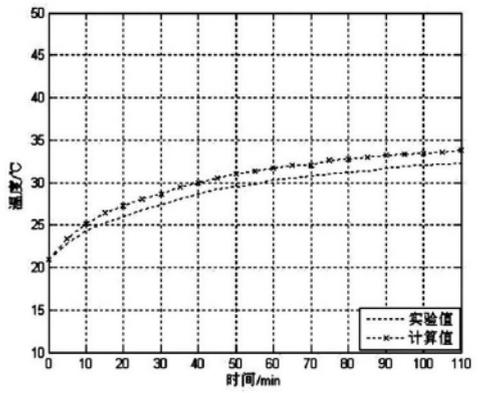


图5 导体温升曲线

由图4、5、6可以看出:采用有限元法得到的计算结果均高于实验数据,随着导体温度的升高,相对误差反而减小。产生误差的原因主要是三方面:①有限

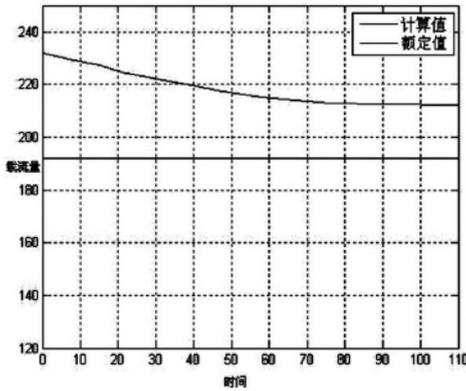


图6 实时载流量曲线

元法的实质是一种近似计算;②电缆参数通常采用厂家的产品值,与实际电缆情况存在误差;③外护套温度值的测量值比真实值偏低,温度传感器与电缆各层存在接触热阻。第三种是主要原因,对温度数据进行超前校正能减小误差。

(2) 恒定负荷下环境温度改变

图7为春季某日上午8点到晚上8点实验室的空气温度变化曲线,电缆负荷为100A时,电缆试样的载流量曲线如图8所示。额定载流量192A是在标准环境情况(空气温度为40℃)利用稳态温度场

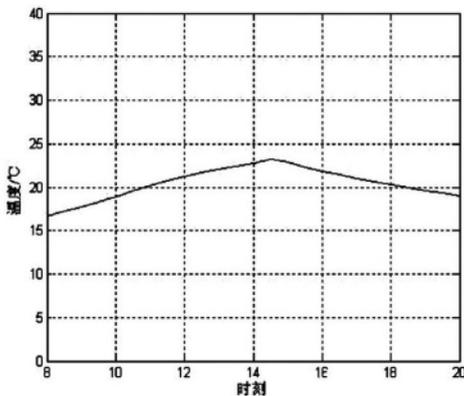


图7 环境温度变化曲线

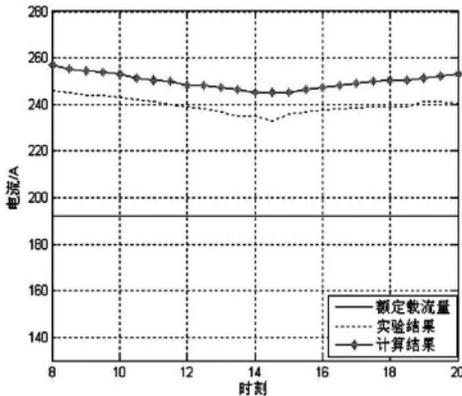


图8 实时载流量曲线

计算得到的。实时载流量的计算值比实验结果略高,在环境温度最高为23.2℃时,计算值为245A,实验值为233A,误差为4.8%;环境温度为16.7℃时,计算值为257A,实验值为246A,误差为4.2%。鉴于一部分误差由实验测温仪器带来的,总体来说,计算值和实验结果是较接近的,根据实时信息提高电缆负荷来挖掘电缆输送潜力是可行的,其实时计算的结果对电力调度人员在电力电缆负荷分配时有重要的参考价值。

4 结论

利用电缆热阻法,用表面温度、环境温度及负荷来间接监测外部热阻,该方法克服了传统载流量计算中对外部热阻难准确获取的困难。在此基础上用迭加法实时计算单芯电缆载流量。

对35kV YJLV 1×50mm²交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆敷设在空气中进行了载流量实验。将负荷和环境温度两种影响因素改变时的实验结果和有限元计算结果进行比较,误差在5%之内,验证了该单芯电缆实时载流量计算方法的有效性和正确性。

参考文献

- [1] Goehlich, L., Donazzi, F., and Gaspari, R. Monitoring of HV Cables Offers Improved Reliability and Economy by Means of Power Sensors [J]. Power Eng. J., 2002, 16 (3): 103 - 110.
- [2] 王东涛,高丹.基于组态王的动力电缆温度在线监测系统[J].中国电力,2006,39(4):79-82.
- [3] 刘毅刚,罗俊华.电缆导体温度实时计算的数学方法[J].高压技术,2005,31(5):52-54.
- [4] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [5] 傅晨钊,汲胜昌,王世山,等.基于有限元法的电缆变压器绕组的暂态热路模型研究[J].电工技术学报,2003,18(2):77-82.
- [6] 于承训.工程传热学[M].成都:西南交通大学出版社,1990.
- [7] 孔祥谦.有限单元法在传热学中的应用(第三版)[M].北京:科学出版社,1998.

作者简介:

李伟(1978),男,工程师,安徽人,高电压与绝缘技术专业硕士研究生毕业,现从事电网技术管理工作。