

光电复合海缆温度场建模分析及在在线监测中的应用

徐志钮¹, 胡志伟¹, 赵丽娟^{*2}, 李永倩², 张翼¹, 胡世勋¹

(1. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 为了有效监测光电复合海缆的绝缘状况, 基于迭代法改进了 IEC60287 电缆载流量和温度场计算标准, 在有限元数值分析软件包 COMSOL 中基于热电耦合模块建立了 110 kV YJQ41×300 mm² 海缆温度场模型, 与改进 IEC60287 标准比较验证了建模方法的准确性, 在此基础上确定了不同载流量下海缆模型最佳的分析范围。建模研究了海缆正常运行和绝缘性能下降情况下载流量和环境温度对光纤温升的影响; 采用介质损耗表征绝缘状况, 分析获得了典型介损值下光纤相对温升的变化规律。结果表明: 正常情况下光纤温升随载流量的增加近似成平方增大, 随环境温度的增加近似线性增大, 增速较慢; 海缆绝缘性能下降时光纤相对温升随 $\tan\delta$ 的增加成正比增大, 相对而言, 受环境温度的影响很小。根据上述研究, 提出了基于光纤相对温升和海缆载流量的介损计算公式和基于光纤相对温升的海缆绝缘状态监测方法。较之现有基于电气量的绝缘监测方法, 该方法不易遭受电磁干扰的影响。在光电复合海缆在线监测方面具有参考应用价值。

关键词: 光纤复合海缆; 温度场; 绝缘状况; 在线监测; 绝缘状态判据

中图分类号: TN818 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0717003

Analysis of temperature field model in optic-electric composite submarine cable and its applications in online monitoring

Xu Zhiniu¹, Hu Zhiwei¹, Zhao Lijuan^{*2}, Li Yongqian², Zhang Yi¹, Hu Shixun¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Department of Electronics & Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To effectively monitor the insulation state of the optic-electric composite submarine cable, the IEC60287 cable' ampacity and temperature calculation standard were improved by iteration algorithm and the temperature field model of 110 kV YJQ41×300 mm² submarine cable was established with the finite element analysis, solver and simulation software package COMSOL based on the thermoelectric coupling model. The results were validated by the improved IEC60287 and the optimal model size of the submarine cable at different values of ampacity was obtained. The effects of ampacity and ambient temperature on the optical fiber' s temperature rise were investigated in normal insulation state and at

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61775057, 51607066); 河北省自然科学基金(E2012502045); 中央高校基本科研业务费专项(2017MS110)

作者简介: 徐志钮(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤分布式传感及在电气设备状态监测中的应用方面的研究。

Email: wzcjxx@sohu.com

通讯作者: 赵丽娟(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光纤通信与传感技术方面的研究。Email: hdzlj1@126.com

different levels of insulation degradation of the submarine cable. Dielectric loss factor was used to characterize the insulation states, the change of optical fiber's relative temperature rise under the typical value of dielectric loss factor was investigated. The results reveal that, under normal circumstances, the temperature rise of fiber is approximately proportional to the square of ampacity and it increases approximately linearly with increasing ambient temperature with a slow velocity. When the cable's insulation degraded, the relative temperature rise of the optical fiber is proportional to the $\tan\delta$. Comparatively, the ambient temperature has little influence on it. According to above research, a formula for estimation of dielectric loss factor based on relative temperature rise and ampacity of cable is presented and a method for insulation degradation evaluation of the submarine cable based on relative temperature rise of optical fiber is proposed. Compared with the existing insulation monitoring methods based on electrical measurands, the error caused by electromagnetic interference can be avoided in proposed method, which can be applied in the online monitoring of the optic-electric composite submarine cable.

Key words: optic-electric composite submarine cable; temperature field; insulation state; online monitoring; criterion of insulation state

0 引言

随着海洋资源的开发和利用,人们对海洋权益的愈加重视,海底电力电缆得到了日益广泛的应用。对其运行状态进行监测和进行故障诊断是后续故障预防和维修的前提,对保证海缆的安全稳定运行十分重要。

海缆绝缘部分容易发生损坏,其状况的好坏直接关系到其能否安全稳定运行。交联聚乙烯(XLPE, Cross-linked polyethylene)电缆绝缘性能的下降存在一定发展期,对该期间反映的相关微弱信息进行监测和综合分析,可对绝缘的可靠性随时做出判断并预测其剩余寿命^[1]。针对 XLPE 电缆绝缘性能下降的机理,目前主要的监测方法有直流法(包括直流成分法和直流叠加法)、交流叠加法、接地线电流法、介质损耗角正切和局部放电测量等方法^[2]。这些方法实际应用的重大难题是需要复杂现场电磁环境下高精度地测量电流、介损和局放等数据。

除了上述电气监测量外,温度也是反映海缆工作状态的一项重要监测指标,它不仅蕴含着海缆的绝缘状态信息,也是海缆绝缘性能的关键影响因素^[3],对温度的监测可降低由于电磁环境造成的监测数据误差。目前用于海缆温度场分析的手段主要有国际电工委员会制定的 IEC60287 标准^[4]及数值计算方法。IEC 标准以等值热路为基础,通过定义各单元热

阻和相关的损耗,结合传热公式进行载流量和温度的计算,由于计算方便且在很多情况下具有较高的准确性,该方法在电缆温度场分析问题上得到了较为广泛的应用^[5-7]。但由于海缆敷设环境的复杂性以及影响传热的可变因素很多,IEC 标准采用的经验公式和参数,比如计算等效电缆非圆环层绞合结构的热阻参数和土壤热阻等时,一定程度上降低了计算结果的准确性^[8]。而且 IEC 标准是将复杂且更准确的温度场问题简化为更简单的热路问题,不可避免引入误差。

通过建立物理模型,采用数值计算方法求解温度场的方式可以逼近真实情况、无需确定修正系数,在有效避免 IEC 标准以上不足的同时,还能保留其自身成本低、试验研究范围广的优点。目前已发表的基于建模方式对电缆温度场进行研究的文献并不多,且主要以研究不同外界条件下的稳态温度场为主,参考文献[5]在提出了一种基于二分法的电缆导体温度计算方法的基础上,以 8.7/15 kV YJV×300 mm² 的单回路 XLPE 电缆为例,分析了敷设方式以及外界环境因素对电缆温度场分布的影响规律;参考文献[6]对电缆所处的环境以及电缆结构类型和参数对载流量和温度场的影响进行了分析,在此基础上对影响电缆运行效率的各类因素进行了综述。综上所述,现今对电缆温度场的建模分析主要针对的是电缆的正常运行状态,对绝缘性能下降时电缆温度

场变化的研究鲜有涉及,更不必提系统的定量研究和故障诊断判据的建立。而且目前主要研究多针对埋地电缆,针对文中涉及海缆的研究并不多。这些因素都一定程度上影响了现有研究结果直接应用于海缆温度场计算的准确性和最终的应用价值。

为了解决以上问题,文中采用迭代法对 IEC 标准进行改进,然后采用改进标准计算了海缆导体工作温度对应的载流量、温度分布以及导体、屏蔽和铠装层的实际发热情况。在有限元分析软件 COMSOL 中基于热电耦合模块建立了海缆温度场计算模型并求解,通过与改进 IEC 标准的比较验证了建模求解的准确性。在确定的建模分析范围的基础上,仿真分析了 YJQ41×300 mm² 型 110 kV 海缆在正常情况下载流量和环境温度对海缆中光纤温升的影响,系统给出了在整个实际工作范围内可能出现的载流量和环境温度对应海缆中光纤的温升数据,为后续故障检测奠定了基础。各种应力长期作用后海缆容易发生整体绝缘性能下降,也就是说沿着轴向绝缘有着相似的老化程度,此时海缆温度场不随轴向取值变化而变化^[9]。文中针对以上情况建立海缆温度场分析模型,以用于通过光纤温升评估整体的绝缘状态。获得了随介损值增加光纤相对温升的变化规律和典型介损值下光纤相对温升随环境温度和载流量的变化情况,拟合获得了根据海缆载流量和光纤相对温升的 $\tan\delta$ 计算公式。基于以上的研究结果,文中进一步提出了基于光纤温度变化的海缆绝缘诊断判据,为海缆在线监测提供了一种新的思路 and 手段。

1 高压交流海缆及其在线监测系统

1.1 海缆结构和参数

文中所研究的 110 kV YJQ41×300 mm² 型海缆是一种光纤复合海缆,光纤集成入海缆中,主要用于海缆的分布式温度测量、数据传输、应变、振动故障探测等功能。该型海缆的结构如图 1 所示,主要由导体、绝缘系统、阻水护套、铠装和外护套组成。导体采用圆铜线绞合,起着承载电流的作用;绝缘系统包括 XLPE 绝缘和屏蔽层,为内外表面极高的电势差提供有效屏障;阻水护套对绝缘进行保护,使其免受水分侵入的损害以保持绝缘强度;铠装是海缆的关键元件,它提供了机械保护和张力的稳定

性;外护套不仅能保护铠装的防腐性能,也能为海缆的敷设提供标记。

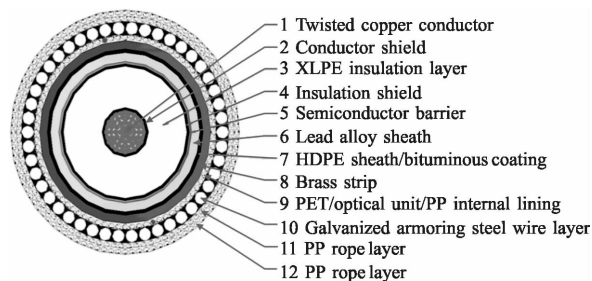
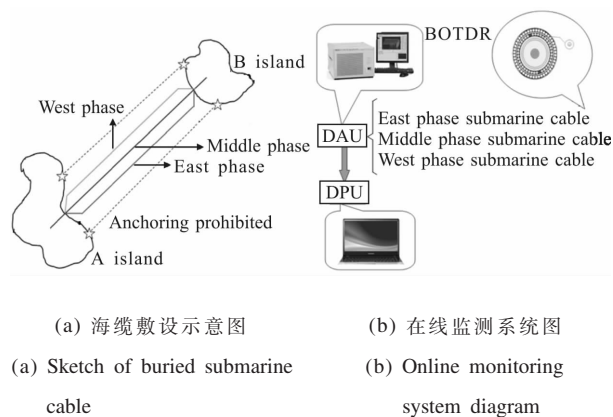


图 1 110 kV YJQ41×300 mm² 型 XLPE 海缆结构

Fig.1 Structure of 110 kV YJQ41×300 mm² XLPE submarine cable

1.2 海缆在线监测系统

对海缆进行在线监测和故障诊断,是实现设备预知性维修的前提和保障设备安全可靠运行的关键^[10]。相对现有的电气监测来说,海缆不同运行状况下的光纤温度是一项较为独立的监测指标,它也是反映海缆温度场和绝缘状态的关键信息。基于光纤布里渊散射特性的分布式传感 (Brillouin Optical fiber Time Domain Reflectometry, BOTDR) 系统^[11],笔者课题组于近年研发并稳定运行的一套基于温度和应变的海缆在线监测系统,所监测海缆为一 110 kV 三相单芯高压光电复合海底电力电缆,其铺设在中国某一海域。该海底电缆线路起自 A 岛,止于 B 岛,示意图如图 2(a)所示。为了保证监测获得的海缆温度和应变信息的精度和系统稳定性,应海缆监测部门要求,监测采用的 BOTDR 系统入射波长为 1 550 nm 时,入射脉冲宽度持续时间最少为 10 ns,对应的空间分辨率为 1 m。



(a) 海缆敷设示意图 (b) 在线监测系统图
(a) Sketch of buried submarine cable (b) Online monitoring system diagram

图 2 BOTDR 海缆在线监测系统

Fig.2 Online monitoring system of submarine cable based on BOTDR

为了保证监测数据的可靠性,如图 2(b)所示的海缆运行状态在线监测系统采用多通道监测方法,即利用 1 和 2 通道监测东相海缆,3 和 4 通道监测西相海缆,5 和 6 通道监测中相海缆。BOTDR 测试设备放置在 B 岛侧,通过普缆连接后将激光脉冲入射进海缆复合单模光纤中,激光在光纤中传输产生布里渊散射光。布里渊散射光反向传输到达发射端,在发射端利用数据采集单元(Data Acquisition Unit, DAU)和数据处理单元(Data Processing Unit, DPU)检测布里渊散射光信号的频移和强度即可得到光纤的应变/温度信息^[12-13]。

2 海缆热电耦合场建模及验证

2.1 建模的思路和特点

海缆建模的整体思路是:采用改进 IEC 标准计算铠装和屏蔽层的热生成率,再根据海缆的实际运行情况确定边界条件,进而对导体采用热电耦合模块建模并求解海缆运行时的温度场。为了提高仿真的准确性,较之前人模型,文中的建模进行了如下的改进:

(1) 用迭代的方法修改了 IEC 标准算法

基于迭代法修改了 IEC 标准,采用改进 IEC 标准计算了铠装和金属屏蔽的热生成率,也为后续具有高精度的 COMSOL 建模计算结果奠定了基础。

(2) 设置更合理的仿真范围

确立了电缆发热温度的有效影响范围,减少计算量的同时确保后续温度场计算的准确性。

(3) 采用热电耦合场研究导体发热

能综合考虑导体电阻率的温升效应和导体的集肤效应系数,更加逼近真实情况。

2.2 迭代法改进 IEC 标准

IEC 标准在计算载流量时,导体温度取额定条件下的工作温度,而金属套和铠装温度采用导体温度乘以一定的修正系数进行估算,估算的温度不可避免存在误差,这样会导致屏蔽与铠装层的热生成率计算不准确,进而造成热路法求得的各层温度存在误差。文中结合迭代法在 IEC 标准的基础上进行改进,也就是在计算过程对电流初值不断进行迭代修正使其逼近给定的导体载流量,该过程中根据导体、金属屏蔽和铠装此时的温度而不是工作温度乘以某一系数来确定三者的温度,根据温度可进一步计算对应的电阻

率。基于上述方法可有效解决屏蔽和铠装层电阻估算不准确带来的问题。文中采用 MATLAB 编程实现由给定单芯海缆正常运行载流量 I_0 计算电缆金属屏蔽和铠装发热功率以及各层温度的程序。

2.3 COMSOL 中海缆温度场建模及验证

在仿真分析各种因素对海缆温度分布的影响之前,首先对该型海缆在 COMSOL 中建立的温度场模型进行验证。

边界条件的确定是海缆有限元仿真中的重要一环,也是分析仿真范围的基础,其包括待分析土壤边界的边界条件类型和传热参数的设置。根据传热学理论,海底土壤本身存在温度场,深层土壤存在恒温层,符合第一类边界条件,设置为固定温度,通常是取土壤平均温度。距海缆左右侧一定距离后热量对该处影响很小,可认为绝热,符合第二类边界条件,因此,设置左右边界法向热流密度为 0。土壤上表面与海水相交,符合第三类边界条件,可设置边界与流体的对流换热系数和流体温度,温度通常是取海水平均温度,仿真中通常将该值设置得与土壤平均温度一致。以上边界条件设置也是现有海缆温度场分析中普遍采用的模式^[5,7]。文中海缆主要部分敷设于海床下方 $d_2=2\text{ m}$ 位置,设海水和土壤的平均温度为 T ,对流换热系数为 h ,则边界条件具体设置如图 3 所示,图中 d 为设置的仿真范围。

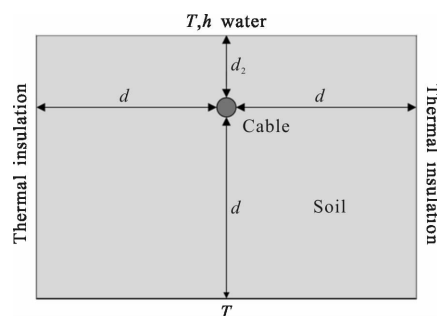


图 3 海缆建模边界条件设置

Fig.3 Boundary conditions in the submarine cable modeling

实际建模中,绝大多数文献在仿真海缆温度场时设置的范围 d 不大于 2~3 m,本例设置 1 倍的余量,即 $d=5\text{ m}$,由 2.4 节分析可知该范围已经足够大。因此,结合埋深构建长宽分别为 10 m 和 7 m,厚度为 1 m 的长方体土壤包裹海缆的模型。海水和土壤平均温度 T 以及对流换热系数 h 会随季节的变化而变化,本例建模针对 7、8 月份时海缆中的温度分布,取

此时海水和土壤平均温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，对流换热系数 $200\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{[13]}$ ，设置载流量为 500 A 。根据上文所述边界条件进行设置后，将计算载流量代入改进 IEC 标准的程序中，计算得到当前工况下屏蔽、铠装的发热功率和导体等效集肤效应系数后的参考电阻率。将屏蔽、铠装的发热以热生成率的形式添加到相应热源模块，将导体设置为热电耦合单元，全部设置完成后，进行温度场计算。图 4 为 COMSOL 中海缆的整体建模与网格划分图以及求解得到的海缆温度场分布结果。

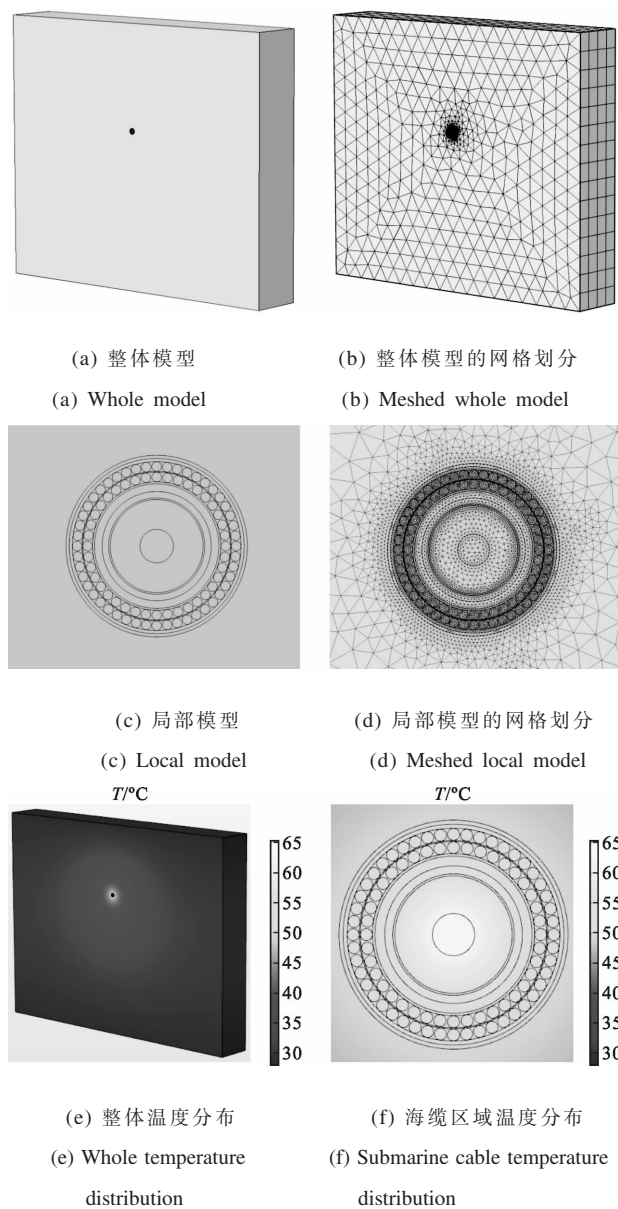


图 4 海缆建模和温度分布结果

Fig.4 Modeling and temperature distribution results of submarine cable

根据建模计算结果得到海缆关键点温度，为了

比较，也在相同工况下采用改进 IEC 标准计算了对应的温度值。二者比较结果显示，COMSOL 仿真与改进 IEC 标准计算的导体、XLPE 外层、金属屏蔽、HDPE(High-Density Polyethylene)外层、光纤温度的差值分别仅为 0.09 、 0.03 、 0.05 、 0.03 、 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，结果较为可靠。电缆外表面的温度差值略大，为 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，很可能是因为 IEC 标准在计算绞合结构时引进的修正系数造成了较大误差，而建模方法就不涉及以上问题。除此之外，较之 IEC 标准，建模方法求解海缆温度场能研究更多且复杂的外界影响因素。由于仅需要设置已知的海缆结构和物理参数，无需考虑修正系数^[14]，其在海缆的故障仿真上也存在应用价值。

2.4 仿真范围的确定

仿真范围选择越大则准确性越高，但计算量也越大。实际上，仿真范围的大小对有限元分析的温度场的准确性和计算量的影响非常大，设置仿真范围是海缆温度场建模分析的一个关键问题。但涉及海缆建模时仿真范围研究的文献却未见报道。且现有文献在不同载流量和温度情况下均使用同一仿真范围，也未给出该范围的由来，这可能会导致温度计算结果的误差，在计算量上也并非较优。本节确定海缆建模时最佳的仿真范围。

确定仿真范围的思路是：设置一个大范围 $d=d_0$ 来计算海缆准确的温度分布，然后在不改变边界参数设置情况下，逐步减少 d 进行仿真。理论上，光纤温度会随着 d 的变小而逐渐变小。当范围 $d=d_1$ 时的光纤温度与 $d=d_0$ 下的光纤温度差等于一个设定较小值 ΔT_1 ，则认为 d_1 为电缆发热实际影响的最大范围。仿真分析时电缆埋深 d_2 始终保持为 2 m 。

文中设置 $\Delta T_1=0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， d_0 取足够大的 5 m ，载流量设置为 $200\sim 700\text{ A}$ ，步长 50 A 。取 700 A 作为最大值是因为：该型号海缆的允许短时最高温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ （不超过 72 h ），认为该温度为稳态时的最大温度，而文中侧重研究稳态情况。根据改进 IEC 标准计算得到的导体在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的载流量为 682.41 A ，将最大载流量设置为 700 A ，满足实际工程的需要。其他参数与图 4 中模型一致。

表 1 为最终得到的海缆不同载流量下仿真计算得到的 $d=5\text{ m}$ 和 $d=d_1$ 时的光纤温度值，据此确定不同载流量下海缆发热影响范围。

表 1 海缆不同载流量下的发热影响范围

Tab.1 Influence range of heating under different ampacity of submarine cable

I/A		700	600	500	400	300	200
Temperature of fiber/ $^{\circ}C$	$d=5\text{ m}$	79.1	63.4	51.4	42.5	36.0	31.5
	$d=d_1$	79.0	63.3	51.3	42.4	35.9	31.4
d_1/m	-	4.40	4.20	3.89	3.45	2.93	2.01

根据表 1 结果可看到：在海缆埋深和环境温度确定的前提下，海缆发热的温度影响范围随载流量的增大而增大，且增大趋势逐渐减缓。考虑到热生成率是影响仿真范围的关键因素。因此，在接下来的故障仿真中，包裹海缆的土壤长方体建模的尺寸可参照表 1 中该载流量/热生成率下对应的建模仿真范围进行设置，这可以有效避免由于全部采用经验方法给出同一仿真范围可能导致的温度计算误差。

3 海缆绝缘性能正常和下降情况的建模仿真

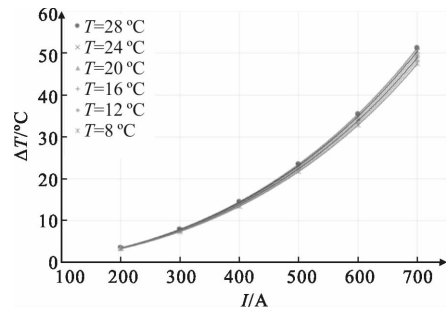
海缆在复杂环境中长期运行，其绝缘层性能会由于受潮老化等原因发生下降，主要体现为绝缘层电阻率下降、漏电导致的绝缘发热功率增大、介损值增加。海缆的绝缘下降程度在未危及安全运行前不会导致保护动作，始终处于工作状态，满足稳态模型，其绝缘层发热功率的增大会影响光纤温度，这部分是文中的研究重点。

除了故障对海缆温度场分布的影响外，笔者也需要研究正常情况下外界因素变化时海缆的温度分布，这将为在线监测提供基础数据。其他外界因素同样会使故障下海缆温升发生变化，进而影响故障判断的准确性。因此，在本节中一并进行研究。

3.1 正常运行下载流量和环境温度变化

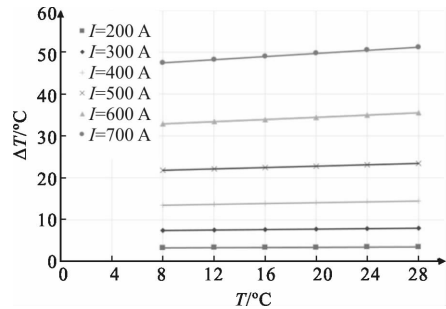
海缆在正常运行情况下光纤温度受外界因素的影响情况是故障分析的基础。按照前文的建模方法，考虑到海缆的实际敷设和工作环境，对环境温度在 8~28 $^{\circ}C$ 内变化、步长为 4 $^{\circ}C$ ，载流量在 200~700 A 内变化、步长为 100 A 的不同工况下的海缆进行了温度场建模仿真。仿真前先通过改进 IEC 标准确定不同情况下的金属屏蔽损耗和铠装损耗，将导体设置为热电耦合单元，其他发热单元以热生成率的形式添加，改变环境温度和载流量参数，计算获得光纤温

度以及光纤温度相对于环境温度的温升数据。不同载流量 I 和环境温度 T 对光纤温升 ΔT 的影响如图 5 所示。理论上载流量为 0 时，光纤温升为 0，故对不同环境温度下的光纤温升 ΔT 与载流量 I 采用 $\Delta T = k \times I^2$ 进行拟合。拟合得到的 k 值在 $9.31 \times 10^{-5} \sim 1.00 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}C/A^2$ 范围内变化，拟合相对误差在 1.14~1.23 $^{\circ}C$ 内分布，拟合系数 k 与相对误差均随着环境温度的升高而略有增大。



(a) 载流量的影响

(a) Influence of ampacity



(b) 环境温度的影响

(b) Influence of ambient temperature

图 5 正常情况下载流量和环境温度对光纤温升的影响

Fig.5 Influence of ampacity and ambient temperature on temperature rise of optical fiber in normal insulation state

从图 5(a)可知，光纤温升随海缆载流值的增加近似成平方规律增大，这是因为载流量的增大会导致海缆金属发热功率以平方的规律增大。温升同样受到环境温度的影响，图 5(b)清楚地反映了环境温度对光纤温升的影响情况，可以看到光纤温升随着环境温度的增加近似线性增大。但比较而言，载流量对温升的影响要远大于环境温度的影响。由图 5(b)可知，载流量越大则环境温度对温升的影响越大。这是因为，当载流量不变时，土壤温度的上升会导致最

终海缆温度的增加。在考虑了金属电阻率的温升效应和一定的环境温度变化量下,导体电阻的变化量为定值,载流量越大则对应的金属发热功率变化量越大,温升变化越显著。

3.2 海缆绝缘性能下降情况建模

3.2.1 基于介损的海缆绝缘性能诊断

介质损耗因数(简称介损, $\tan\delta$)是表征绝缘在交变电压作用下损耗大小的特征参数,电缆的绝缘老化时间和介损值之间有很好的相关性^[15],后者在线监测上得到了广泛的应用。日本在电缆介损法的研究方面处于领先地位,表 2 是住友电气公司提供的根据介损的 XLPE 电缆绝缘诊断判据^[16-17]。

表 2 XLPE 电缆介损绝缘诊断判据

Tab.2 XLPE cable insulation evaluation criterion based on dielectric loss factor

$\tan\delta$	Evaluation	Suggestion
≤ 0.002	Normal	Continue to run
0.002-0.005	Cautionary	Measurement at shorter intervals
0.005-0.05	Seriously cautionary	Prepare new cables
≥ 0.05	Bad	Be replaced

电气设备绝缘正常状态下的 $\tan\delta$ 仅为万分之几到千分之几,准确和稳定地提取绝缘中电流的难度较高。同时由于电缆的半导体层电阻与屏蔽层接触电阻的存在导致实测的 $\tan\delta$ 值比理论值要大。因此,通过直接测量 $\tan\delta$ 的方式实现海缆绝缘在线监测难度较高。基于以上考虑,采用光纤温度的变化量来间接反映 $\tan\delta$ 的变化,进而检测绝缘状态具有潜在优势。

XLPE 海缆的介质损耗的计算公式为:

$$W_d = \omega C U^2 \tan\delta \quad (1)$$

由于等值电容 C 在电缆实际运行过程中变化不大^[18],故在确定 ω 、 U 的情况下,认为介质损耗仅与 $\tan\delta$ 相关且成正比。

3.2.2 $\tan\delta$ 对光纤相对温升的影响及绝缘诊断判据

建模仿真中,模型尺寸材料等参照 3.1 节,根据表 2 取不同绝缘性能下对应的 $\tan\delta$,由公式(1)计算获得不同 $\tan\delta$ 下绝缘层的功率损耗,仿真计算得到对应的光纤温度。文中将环境温度和载流量不变时

仅由绝缘参数($\tan\delta$)变化导致光纤的温升称为光纤相对温升,记为 ΔT_2 。图 6 给出了环境温度为 20℃、载流量为 500 A、 $\tan\delta$ 在 0.001~0.1 内变化时光纤相对温升的变化情况。

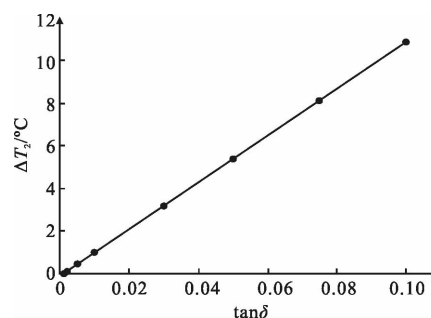


图 6 $\tan\delta$ 对海缆内部光纤相对温升的影响

Fig.6 Influence of $\tan\delta$ on relative temperature rise of optical fiber in submarine cable

由图 6 可知,由介质损耗导致的光纤相对温升随 $\tan\delta$ 的增加几乎成正比增大。这是因为在常见的 $\tan\delta$ 变化范围内,由于 $\tan\delta$ 增加导致的温升对金属电阻值影响很小,由其导致的热生成率的影响几乎可以忽略,光纤相对温升的变化主要由 $\tan\delta$ 变化导致的绝缘层热生成率变化所致。

$\tan\delta$ 取正常值 0.001^[8],仿真得到环境温度 T 为 8~28℃,载流量 I 为 200~700 A 时的光纤温度,作为标准值,如表 3 所示。再根据绝缘性能下降后 $\tan\delta$ 的变化情况,分别取 $\tan\delta=0.002$ 、0.005、0.05 下算得的光纤相对温升如表 4 所示。

表 3 $\tan\delta=0.001$ 时不同载流量和环境温度下的光纤温度(单位:℃)

Tab.3 Optical fiber temperature at different ampacity and ambient temperature when $\tan\delta=0.001$ (Unit:℃)

$T/^\circ\text{C}$	I/A					
	200	300	400	500	600	700
28	31.53	35.97	42.51	51.49	63.46	79.21
24	27.48	31.86	38.30	47.15	58.94	74.48
20	23.42	27.74	34.09	42.80	54.43	69.74
16	19.38	23.63	29.87	38.46	49.91	65.00
12	15.34	19.51	25.66	34.12	45.40	60.26
8	11.29	15.43	21.44	29.77	40.88	55.50

表 4 不同载流量、环境温度、 $\tan\delta$ 下的光纤相对温升 ΔT_2 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Tab.4 Optical fiber relative temperature rise ΔT_2 at different ampacity, ambient temperature and $\tan\delta$ (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

tan δ	T/ $^{\circ}\text{C}$	//A					
		200	300	400	500	600	700
0.002	28	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	24	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	20	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	16	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	12	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	8	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
	28	0.40	0.41	0.42	0.44	0.46	0.49
	24	0.40	0.41	0.42	0.44	0.46	0.49
0.005	20	0.40	0.41	0.42	0.44	0.46	0.49
	16	0.40	0.41	0.42	0.44	0.46	0.49
	12	0.40	0.41	0.42	0.44	0.46	0.49
	8	0.40	0.40	0.42	0.44	0.46	0.49
	28	4.91	5.01	5.16	5.36	5.64	5.99
	24	4.91	5.01	5.16	5.36	5.64	6.00
	20	4.91	5.01	5.16	5.37	5.64	6.00
	16	4.91	5.01	5.17	5.37	5.64	6.01
0.05	12	4.90	5.01	5.17	5.37	5.65	6.01
	8	4.91	5.00	5.16	5.37	5.65	6.01

由表 4 可知, 随 $\tan\delta$ 值的增加光纤相对温升几乎严格成正比增大, 这与图 6 的结论一致。环境温度在建模的 8~28 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 基本不影响介损增大时光纤的相对温升。载流量的增大会导致光纤相对温升的增大, 这在 $\tan\delta$ 值较大时表现得更加明显。因此, 影响光纤相对温升的主要因素是 $\tan\delta$ 和载流量。根据表 4 中数据, 以及实测光纤相对温升和载流量后可以通过插值的方式获得海缆绝缘此时的 $\tan\delta$ 值。当然也可以根据表 4 数据采用最小二乘拟合获得基于光纤相对温升和载流量的 $\tan\delta$ 计算公式, 如公式(2)所示, 它的拟合相对误差仅为 1.11%。基于插值或公式(2)算得海缆绝缘 $\tan\delta$ 后根据表 2 即可判断当前

海缆的绝缘状态。

$$\tan\delta = (\Delta T_2 + 4.02 \times 10^{-5} I - 9.10 \times 10^{-2}) / (89.94 + 4.26 \times 10^{-2} I) \quad (2)$$

比较而言, $\tan\delta$ 增加导致的光纤相对温升受环境温度和载流量的影响不大。为了增加判据的简洁性和易用性, 近似地, 实际情况下海缆在不同的环境温度和载流量时可以使用同一个基于光纤温度的绝缘性能诊断规则, 而不必考虑环境温度和载流量的影响。所以, 根据建模所获得的 $\tan\delta = 0.002$ 、 0.005 、 0.05 所对应的光纤相对温升数据结果, 可得到不同绝缘老化程度下的阈值, 作为衡量文中海缆绝缘性能的判据: 当对实测的海缆光纤温度相对于相同的环境温度和载流量下的光纤温升小于 0.1°C 时则对应 $\tan\delta$ 小于 0.2% , 海缆处于正常可继续使用状态; 当光纤相对温升大于 0.1°C 而小于 0.5°C 时则对应 $\tan\delta$ 大于 0.2% 而小于 0.5% , 此时需轻度注意, 海缆仍可正常使用; 当光纤相对温升大于 0.5°C 而小于 5°C 时对应 $\tan\delta$ 大于 0.5% 而小于 5% , 海缆应在有戒备下使用; 当光纤相对温升大于 5°C 则对应 $\tan\delta$ 大于 5% , 需及时更换海缆。根据以上分析笔者建立了光纤相对温升到海缆绝缘状态的关系, 即基于光纤相对温升的海缆绝缘状态判据。

基于第 2 节介绍的笔者课题组研发的海缆分布式光纤温度在线监测系统可实时测量光纤的温度。当海缆的绝缘性能下降时, 通过实时采集的光纤整体的平均温度, 将其与基于表 3 和插值算法得到的对应载流量和环境温度下的正常光纤温度进行对比, 然后采用文中提出的基于光纤相对温升的海缆绝缘状态判据, 即可对海缆的绝缘运行状况进行初步判断, 为后续的运行、检修提供参考。以上提出的基于光纤相对温升的海缆绝缘性能诊断判据, 可为海缆的检修奠定基础。

4 结 论

基于 COMSOL 热电耦合模块, 文中建立了光电复合海缆的温度场模型并验证了其可靠性, 确立了模型的边界条件和分析范围, 分析了正常情况下载流量和环境温度对光纤温度的影响, 得到了海缆绝缘性能下降程度与光纤相对温升的关系并分析了相关因素的影响。主要结论有:

- (1) 确定不同载流量下海缆模型最佳的分析范围, 在确保准确性的同时减少了计算量;

(2) 随载流量增加光纤温升近似成平方规律增大,随环境温度增加温升近似线性增大,但增速较慢;

(3) 光纤相对温升随介损增加几乎成正比增大。系统计算获得了不同载流量、环境温度和 $\tan\delta$ 下的光纤相对温升,提出了基于插值的海缆绝缘 $\tan\delta$ 的计算方法,给出了对应的计算公式,形成了海缆绝缘性能诊断判据。较之现有基于电气量的绝缘检测方法,该方法不易遭受电磁干扰的影响。

文中研究结果对光电复合海缆绝缘故障的监测具有参考应用价值。

参考文献:

- [1] Orton H. Power cable technology review [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(4): 1057-1067.
- [2] Li Wei, Wu Linlin, Zhang Xing, et al. Research progress in aging and evaluation of XLPE cable [J]. *Insulating Materials*, 2016, 49(11): 36-44. (in Chinese)
- [3] Xu Jun, Wang Xiaodong, Ouyang Benhong, et al. Effect of thermal aging on physical and chemical structure of XLPE cable insulation [J]. *Insulating Materials*, 2013, 46(2): 33-37. (in Chinese)
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC60287 -1 Calculation of the current rating -part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses [S]. 2006: 11-25.
- [5] 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, 35(12): 3086-3092. (in Chinese)
- [6] Karahan M, Kalenderli O. Coupled Electrical and Thermal Analysis of Power Cables Using Finite Element Method [M]. US: InTech, 2011: 206-230.
- [7] Lv Anqiang. Research on condition monitoring of optical fiber composite submarine power cable based on bistructured strain and temperature sensing technology using optical fiber [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 57-61. (in Chinese)
- [8] Worzyk T. Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [9] Naskar A K, Bhattacharya N K, Saha S, et al. Thermal analysis of underground power cables using two dimensional finite element method [C]//2013 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, IEEE, 2014, 2: 94-99.
- [10] Toliyat H A, Nandi S, Choi S, et al. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis [M]. Abingdon: Taylor & Francis, 2012.
- [11] Zhao Lijuan, Li Yongqian, Xu Zhiniu, et al. Online monitoring system of 110 kV submarine cable based on BOTDR [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 216(3): 28-35.
- [12] Lv Anqiang, Li Yongqian, Li Jing, et al. Strain and temperature monitoring of 110 kV optical fiber composite submarine power cable based on Brillouin optical time domain reflectometer [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(2): 533-539. (in Chinese)
- [13] Zhao Lijuan, Li Yongqian, Xu Zhiniu. Influence of optimization model on parameter extraction in Lorentzian Brillouin scattering spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0522002. (in Chinese)
- [14] Baazzim M S, Alsaud M S, Elkady M A. Comparison of finite-element and IEC methods for cable thermal analysis under various operating environments [J]. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2014, 8(3): 470-475.
- [15] Mecheri Y, Boukezzi L, Boubakeur A, et al. Dielectric and mechanical behavior of cross-linked polyethylene under thermal aging [C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2000: 884022.
- [16] Soma K, Aihara M, Kataoka Y. Diagnostic method for power cable insulation [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1986, 21(6): 1027-1032.
- [17] Zhang Hailong. 110-220 kV XLPE cable insulation on-line monitoring technique [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)
- [18] Wang Hongxin, Cheng Shukang, Wen Xishan, et al. AC insulation characteristics of XLPE in the course of aging [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(3): 7-9. (in Chinese)