

# ±160 kV 直流 XLPE 海底电缆载流特性仿真及试验

刘云鹏<sup>1,2</sup>, 许自强<sup>1</sup>, 陈铮铮<sup>3</sup>, 刘贺晨<sup>1</sup>

(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 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

3. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**南澳岛±160 kV 多端柔性直流输电工程在我国首次采用了高电压、大长度的挤包绝缘直流电缆系统, 而目前国内尚无此电压等级直流电缆工程的运行及维护经验, 因此亟需对交联聚乙烯(XLPE)直流电缆的载流特性展开研究, 从而为直流电缆线路运行限值的控制以及在线监测系统的定制提供技术支持。通过研究不同敷设环境下直流电缆的散热原理, 采用专业有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立了带保护套管理地敷设方式下±160 kV 直流 XLPE 海底电缆的温度场模型, 用以模拟其温度分布和计算其载流量; 通过在试验场地开展静态载流试验, 对仿真模型的可靠性进行了验证; 对试验结果进行讨论, 分析得出了直流海缆的载流特性。

**关键词:**直流海底电缆; 载流量; 有限元法; 仿真计算; 现场试验

**中图分类号:**TM 247

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.017

## 0 引言

随着海上风力发电技术的发展和电网国际化进程的加快, 远距离跨海域联网工程得到了更为广泛的关注和重视。海底电力电缆作为其中的关键组成部分, 承担着电能传输的重要任务<sup>[1-3]</sup>。

考虑到交流输电技术本身存在着一些无法克服的固有缺陷, 尤其是远距离交流输电系统受到同步运行稳定性的限制, 因此, 柔性直流输电技术在近年来获得了快速发展。目前, 以交联聚乙烯 XLPE (Cross Linked Polyethylene) 为主绝缘材料的橡塑电缆已广泛应用于多个电压等级的柔性直流输电工程中<sup>[4-8]</sup>。但就总体情况而言, 我国 XLPE 绝缘直流海底电缆仍在维持着运行数目少、运行时间短、运行维护经验匮乏的现状。

载流量是海底电缆运行中的重要参数, 指的是在满足线芯工作温度不超过绝缘系统耐热寿命允许值和导体连接可靠性符合要求的前提下, 电缆线路运行时线芯导体中通过的电流。当线芯电流过大、产生的热量过高时, 将导致线芯工作温度超过允许限值, 绝缘材料老化速度加快, 电缆的寿命相比期望值将会大幅缩短; 当线芯电流过小时, 虽然产生的热量减少, 但是将造成电缆的传输能力得不到充分的利用, 从而降低线路运行的经济性。目前国内该

领域的多数研究都是围绕交流电缆载流量<sup>[9-12]</sup>, 而针对直流电缆载流特性的研究成果仍然比较少, 文献[13-14]虽然针对直流电缆稳态载流量的解析计算方法和有限元仿真计算方法进行了一定的研究, 但缺少相关的试验验证。

南澳岛±160 kV 柔性直流输电工程作为我国首个高电压、大长度的挤包绝缘直流系统, 本文以更好地保障其海底电缆线路的安全经济运行为目的, 对其 XLPE 绝缘直流海底电缆的载流特性进行相关理论及试验研究, 具有十分重要的工程实用价值, 同时也为直流电缆线路在线监测系统的定制以及运行限值的控制提供技术参考。

## 1 稳态温度场有限元模型

工程中通常使用解析法和数值法 2 种方法对电力电缆载流量进行计算。作为数值计算方法的代表, 有限元法可以模拟实际的边界条件, 适用于比较复杂的电力电缆系统。有限元法通过将整个场域划分为有限个微小单元, 并对每个单元使用不同的基函数进行温度计算, 最后将所有单元的计算结果进行叠加求解<sup>[15-18]</sup>。

南澳±160 kV 多端柔性直流输电工程采用的海底电缆型号为 DC-HYJQ41-F-160kV-1×500+2×1, 本节将选取该型号海底电缆作为研究对象。通过查阅厂家提供的生产资料以及相同型号海底电缆和相似结构海底电缆的相关文献<sup>[9,14,19]</sup>, 整理其结构性参数如表 1 所示, 其结构分层情况如图 1 所示。

收稿日期: 2017-02-27; 修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900705)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900705)

表 1 直流海底电缆主要结构与物性参数表

Table 1 Parameters and main structures of DC submarine cable

| 结构层       | 导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ] | 半径/mm |
|-----------|-------------------------------|-------|
| 铜导体层      | 400                           | 13.35 |
| 导体屏蔽层     | 0.285 7                       | 14.55 |
| XLPE 绝缘层  | 0.285 7                       | 30.55 |
| 绝缘屏蔽层     | 0.285 7                       | 31.55 |
| 半导电缓冲带    | 0.166 7                       | 32.55 |
| 合金铅套      | 35.3                          | 35.45 |
| HDPE 护套   | 0.285 7                       | 38.20 |
| PE 填充条    | 0.285 7                       | 44.20 |
| PP 内垫层    | 0.22                          | 45.70 |
| 钢丝铠装      | 50                            | 51.70 |
| 沥青+PP 外被层 | 0.22                          | 55.70 |

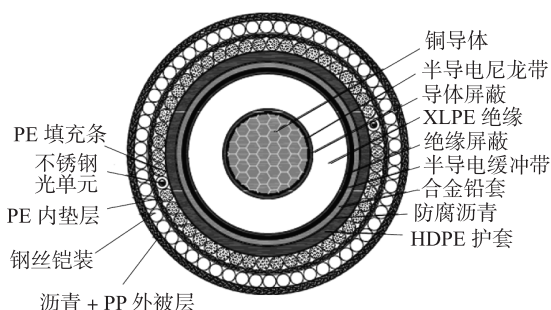


图 1 直流海底电缆结构剖面图

Fig.1 Constructure of DC submarine cable

在实际直流输电线路工程中,根据海底电缆的埋地敷设环境,可将其敷设方式大致分为陆地段、滩涂段及海床段 3 种。而考虑到具体工程实施时某些节点特殊段,又可将其敷设方式细分为海底直埋、登陆段带保护套管理地、陆地直埋、陆上电缆沟以及直埋排管等。

根据实际工程经验总结以及分析文献<sup>[20-21]</sup>可以认为,登陆段带保护套管理地的敷设方式是研究直流海底电缆载流量的瓶颈,所以本文主要针对这种敷设方式下直流海底电缆的温度分布和载流特性展开研究。通过使用专业有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 进行电力电缆温度场有限元数值计算,其仿真模型如图 2 所示。

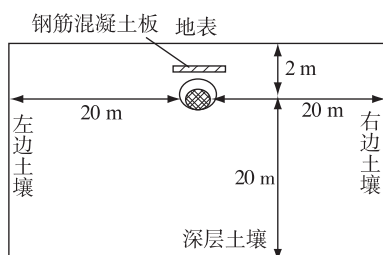


图 2 直流海底电缆温度场仿真模型

Fig.2 Simulation model of thermal field of DC submarine cable

由图 2 可知,直流海底电缆的敷设条件为:海底

电缆轴心距地表的埋设深度为 2 m,同时为了起到保护作用,工程中会在海底电缆外侧套上聚氯乙烯塑料(PVC)保护套管,并在保护套管上方铺设一层钢筋混凝土板。需要说明的是,海底电缆表面和 PVC 管内表面间的狭小空间内为空气,其中的热量传递方式还包括热对流、热辐射。但由于流体的体量较小,保护套管的传热方式更接近于热传导<sup>[22]</sup>。

### 1.1 热源分析

众所周知,交流电缆的损耗主要包括线芯导体损耗、绝缘层损耗、护套损耗以及铠装层损耗等。与交流电缆不同,直流电缆的损耗仅包括导体线芯的焦耳损耗<sup>[5]</sup>。

由欧姆定律可知,单位长度直流电缆线芯导体发热量  $W_c$  的计算公式为:

$$W_c = I_c^2 R' \quad (1)$$

$$R' = R_0 [1 + \alpha(\theta_c - 20)] \quad (2)$$

其中,  $I_c$  为电缆线芯导体流过的电流值;  $R'$  为运行在温度  $\theta_c$  (°C) 下电缆线芯导体的直流电阻值;  $R_0$  为运行在 20 °C 下线芯导体的直流电阻值;  $\alpha$  为线芯导体材料的温度系数,IEC 标准的推荐值为 0.003 93。

### 1.2 边界条件的确定

由上述内容可知,本文的研究场域是一个半无限大二维平面温度场,故需要将此开域场转变为闭域场才能顺利进行求解,具体边界条件的确定方法如下所述。

文献[23-24]指出,深层土壤的温度不随地表温度变化而保持在一个恒定的值,即土壤深处的温度不受海底电缆发热的影响,因此取与海底电缆相距 20 m 的深层土壤作为模型的第一类边界条件;同样,远离热源的土壤左右边界也不会受到海底电缆发热的影响,为热绝缘状态,因此设距离海底电缆本体 20 m 的土壤左右边界作为模型的第二类边界条件;作为流体介质,空气会与土壤产生自然对流换热,因此取地表作为模型的第三类边界条件。其中,在不考虑地表风速影响时,对流换热系数  $\gamma$  的计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$\gamma = N_{um} \frac{\lambda}{l} \quad (3)$$

$$N_{um} = c (G_r P_r)^n \quad (4)$$

$$G_r = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{v^2} \quad (5)$$

其中,  $N_{um}$  为努塞尔数;  $G_r$  为格拉晓夫数;  $P_r$  为普朗特数;  $\lambda$  和  $v$  分别为导热系数和比热容,可根据空气温度表查找得知;  $\beta$  为体积膨胀系数;  $g$  为重力加速度,

单位为  $\text{m/s}^2$ ;  $\Delta t$  为温差,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;  $l$  为特征尺寸,单位为  $\text{m}$ ;  $c$  和  $n$  为根据层流或湍流而取得的系数。

## 2 直流海底电缆载流量验证试验

### 2.1 海底电缆敷设方式

根据上述的海底电缆温度场仿真模型图,本文试验将 12 m 的 DC-HYJQ41-F-160kV-1 $\times$ 500+2 $\times$ 1 型号海底电缆主体穿入 PVC 导管后直埋敷设,并在 PVC 导管上方铺设一层宽度为 1 m 的钢筋混凝土板,海底电缆的敷设深度为 2 m, PVC 导管外径为 200 mm,厚度为 4 mm,试验线路的敷设剖面示意图如图 3 所示。与此同时,为了防止在试验过程中水分侵入海底电缆,试验人员在导管连接处及端部均进行了密封处理,并对土壤导热系数展开测量并用于理论分析。

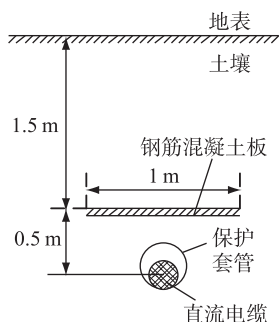


图 3 海底电缆敷设条件示意图

Fig.3 Schematic diagram of laying condition of submarine cable

### 2.2 温度测量方式

本文试验通过在海底电缆多个位置安装测温热电偶,直接测量海底电缆各部位温度,再通过研华 Adam 4118 模块实现测量信号与温度值的转化,这种技术已广泛应用于电力电缆预鉴定等试验中。试验中选用的热电偶类型为 T 型热电偶,它具有安装方便、接触点体积小、热容量小、灵敏度高、适用温度范围广的特点,比较适用于电缆载流量试验。

为了保证能够获得足够的温度数据样本,避免由于安装和运行过程中的热胀冷缩等不确定因素对各位置温度的影响,在被试海底电缆上安装了 3 组热电偶,每组热电偶分别测量电缆导体、铅套及铠装的温度,相邻组之间距离约为 0.5 m。为了避免电缆导体连接处的过热对导体温度测量的影响,热电偶安装位置集中在电缆位于导管段的中间位置。海底电缆测温示意图如图 4 所示。

### 2.3 试验结果及分析

根据实际工程资料可知,被试直流海底电缆在

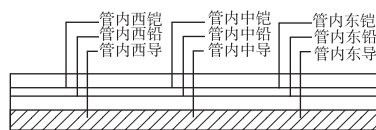


图 4 测温示意图

Fig.4 Schematic diagram of temperature measurement

正常运行时导体的最高允许工作温度为  $70^{\circ}\text{C}$ 。在试验过程中,通过使用大电流发生器给试验电缆施加一定的持续负荷电流,当达到稳态时观察导体温度是否达到  $70^{\circ}\text{C}$ ,如果导体温度超过  $70^{\circ}\text{C}$ ,则减小电流;如果导体温度小于  $70^{\circ}\text{C}$ ,则增大电流,反复调节电流大小,直到新的稳态时导体温度等于  $70^{\circ}\text{C}$ ,此时的电流值即为试验电缆的实际静态载流量,重复进行 2 次静态载流试验以确保试验结果的正确性。2 次独立载流试验的结果分别如表 2、表 3 所示。

表 2 试验一结果

Table 2 Results of Test 1

| 部件 | 稳态测量温度/ $^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |
|----|----------------------------|------|------|------|
|    | 东侧                         | 中间   | 西侧   | 均值   |
| 导体 | 70.3                       | 69.7 | 69.4 | 69.8 |
| 铅套 | 41.6                       | 41.2 | 41.1 | 41.3 |
| 铠装 | 34.2                       | 33.9 | 33.6 | 33.9 |

表 3 试验二结果

Table 3 Results of Test 2

| 部件 | 稳态测量温度/ $^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |
|----|----------------------------|------|------|------|
|    | 东侧                         | 中间   | 西侧   | 均值   |
| 导体 | 69.1                       | 68.6 | 68.7 | 68.8 |
| 铅套 | 41.3                       | 40.8 | 40.6 | 40.9 |
| 铠装 | 34.1                       | 33.7 | 33.6 | 33.8 |

完整的试验二结果如图 5、6 所示。需要说明的是,图中所显示的温度数值为 3 组热电偶采集数据的均值。静态载流试验从零负荷开始对海底电缆施

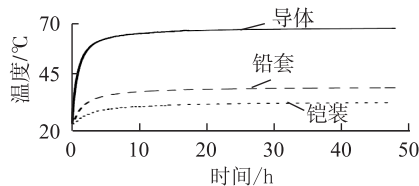


图 5 试验二海底电缆温度曲线

Fig.5 Temperature curve of submarine cable in Test 2

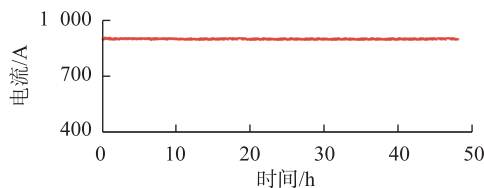


图 6 试验二负荷电流曲线

Fig.6 Load current curve in Test 2

加(900±10) A 的持续负荷电流,零负荷时导体、合金铅套层以及铠装层的温度约为 25 ℃,经过 10 h 后海底电缆导体温度逐渐进入稳态,上升趋势变缓,最终经 48 h 导体温度达到 68.8 ℃,已经非常接近导体的最高允许工作温度。

综上所述,当负荷电流为(900±10) A 时,2 次试验中海底电缆稳态导体温度均值分别为 69.8 ℃ 和 68.8 ℃,试验结果接近,因此可以认为在该种敷设方式及环境下其静态载流量约为 900 A。同时,结合该电缆进行预鉴定试验时的相关数据,在导体温度为 70 ℃ 时的高负荷电流范围为 750~900 A,此试验数据也间接证明了试验结果的正确性。

## 2.4 仿真与试验结果对比分析

通过分析直流海底电缆静态载流试验的敷设环境和敷设方式,采用专业有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立其稳态温度场分布模型。海底电缆登陆段带保护套管敷设方式下的整个温度场区域网格剖分及海底电缆局部区域网格剖分如图 7 所示,其中对于材料参数较为均匀的土壤区域,剖分的单元网格尺寸较大;对于材料参数差异较大以及各结构层厚度较小的海底电缆本体区域,剖分的单元网格尺寸较小,这样在保证计算精度的同时节省了不必要的计算量。

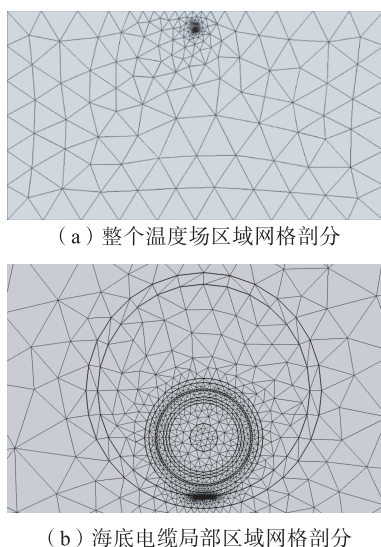


图 7 温度场整体与局部网格剖分图

Fig.7 Overall and local grid dissection of thermal field

针对登陆段带保护套管敷设方式下运行的海底电缆温度场模型,考虑到温度仅在海底电缆本体附近变化较为剧烈,故将第一、二类边界条件与海底电缆的距离设置为 20 m。由于本次试验在冬季进行,且在试验期间有较大降雨,模型中具体边界条件及相关热参数的设置如下所述:

a. 根据上文所述,验证试验选取的海底电缆型号为 DC-HYJQ41-F-160kV-1×500+2×1,故模型中海底电缆各部件导热系数的设置参考调研结果表 1;

b. 根据试验中土壤导热系数的测量结果,模型中土壤的导热系数设为 1.9 W/(m·K);

c. 模型中热源的设置依据式(1)、(2),根据试验海底电缆的线芯导体材料及规格,并参考 IEC 60228<sup>[5]</sup> 标准中 2 类铜导体电阻值的设定情况,将运行在 20 ℃ 下 500 mm<sup>2</sup> 铜导体的直流电阻值  $R_0$  取值为  $3.66 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ ;

d. 根据文献[26-29],模型中第一类边界条件,即与海底电缆相距 20 m 的深层土壤温度设为 8 ℃;

e. 根据环境测量数据,试验期间昼夜温差较小,模型中第三类边界条件中的地表空气温度取试验时间段内空气温度测量结果的均值,其值为 5 ℃,地表与空气间的自然对流换热系数依据式(3)~(5)进行计算,取值为 12.5 W/(m<sup>2</sup>·K)。

最后的仿真结果如图 8 所示。通过分析直流海底电缆的静态载流试验结果可知,当负荷电流为 900 A 时,其稳态导体温度约为 70 ℃。有限元模型的仿真结果显示,在海底电缆登陆段带保护套管的敷设方式和环境下,其静态载流量约为 874.3 A。通过将仿真结果与载流量试验结果相比较,得到误差率为 2.856% < 3%,可以认为有限元模型的仿真结果是较为准确的。

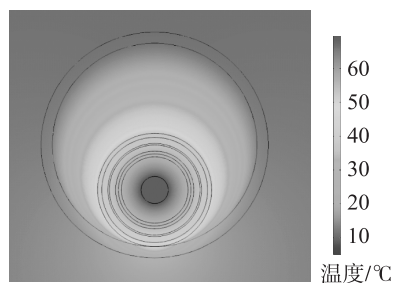


图 8 直流海底电缆温度分布图

Fig.8 Temperature distribution of submarine cable

## 3 影响因素讨论

通过分析静态载流试验的结果可以发现,在冬季多雨环境下运行的直流海底电缆,其载流量较夏季工程现场的测量数据有较大的差距,所以运行环境对海底电缆静态载流量的影响值得进行深入讨论。

试验中影响载流量的主要环境因素是空气温度和土壤热阻系数,本节在已经验证有限元仿真模型

准确性的前提下,将针对上述环境因素对海底电缆静态载流量的影响展开分析。

### 3.1 空气温度对静态载流量的影响

地表空气温度对海底电缆静态载流量有非常明显的影响,空气温度高,则土壤散热能力较差;反之,空气温度低,则土壤散热能力增强。因此,利用上述温度场模型模拟地表空气温度在  $5 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内变化时,直流海底电缆载流量的变化情况。模型中控制的相关条件如下所述。

a. 文献[23-24]指出,深层土壤温度不随地表温度变化而保持在一个恒定值,因此第一类边界条件,即距海底电缆  $20\text{ m}$  的深层土壤的温度保持在  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  而不随空气温度变化而变化,同时取土壤导热系数为  $1.9\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

b. 空气温度变化会造成自然对流换热系数的变化,但是文献[30-31]指出,对流换热系数的变化对电缆导体温度的影响很小。与此同时,由于空气自然对流换热系数的取值大致在  $5 \sim 25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  范围内<sup>[32]</sup>,故本文利用 COMSOL 计算了线芯电流为  $874.3\text{ A}$ 、对流换热系数取范围内不同值时的温度场,导体最高温度结果如表 4 所示。由表 4 可知,导体温度最大仅相差  $0.409\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此,本文选择忽略这种影响,对流换热系数仍取  $12.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

表 4 仿真结果

Table 4 Simulative results

| 对流换热系数/<br>[ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ] | 稳态导体<br>温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 对流换热系数/<br>[ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ] | 稳态导体<br>温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 5.0                                                          | 70.296                         | 18.5                                                         | 69.924                         |
| 8.5                                                          | 70.091                         | 25.0                                                         | 69.887                         |
| 12.5                                                         | 69.993                         |                                                              |                                |

随着地表空气温度的增大,海底电缆载流量的变化趋势如图 9 所示,即海底电缆载流量与空气温度呈近似的线性下降关系,空气温度每升高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,载流量约降低  $6.6\text{ A}$ 。

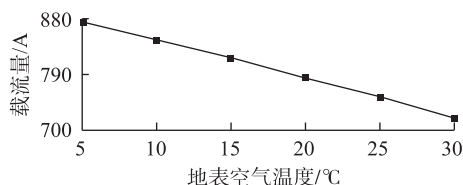


图 9 直流海底电缆载流量与地表空气温度关系曲线

Fig.9 Relationship between ampacity of DC submarine cable and ground air temperature

### 3.2 土壤导热系数对静态载流量的影响

埋地电缆通过周围土壤向地表散热,因此土壤导热系数是直接影响海底电缆静态载流量的重要因

素。土壤导热系数取决于土壤类型及其物理特性和热特性,尤其对土壤中水分含量的变化特别灵敏。因此,利用上述温度场模型模拟土壤导热系数在  $0.8 \sim 2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  范围内变化时,直流海底电缆载流量的变化情况。模型中控制的环境条件如下:

a. 第一类边界条件,即距海底电缆  $20\text{ m}$  的深层土壤温度为  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

b. 第三类边界条件,即地表空气温度为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,地表与空气间的对流换热系数为  $12.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

随着土壤导热系数的增大,海底电缆载流量的变化趋势如图 10 所示,即海底电缆载流量随着土壤导热系数的增大呈逐渐饱和的上升趋势,说明海底电缆静态载流量所受到的影响作用随着土壤导热系数的增大而逐渐减弱。

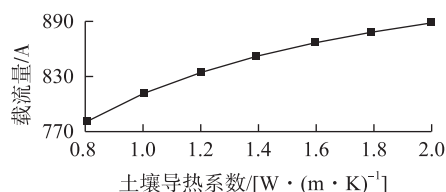


图 10 直流海底电缆载流量与土壤导热系数关系曲线

Fig.10 Relationship between ampacity of DC submarine cable and thermal conductivity of soil

## 4 结论

本文针对  $\pm 160\text{ kV}$  直流 XLPE 海底电缆在登陆段带保护套管敷设方式下的静态载流特性进行了仿真及试验研究,根据试验结果主要可以得出以下结论。

a. 海底电缆的静态载流试验结果说明,在冬季多雨的环境下,海底电缆的静态载流量约为  $900\text{ A}$ 。这是由于土壤潮湿引起土壤导热系数增大,且地表空气温度较低,增强了土壤的散热能力,从而造成试验结果比在夏季晴朗干燥情况下运行时的海底电缆载流量的大很多的情况。

b. 通过将理论仿真结果与现场试验结果进行比较,验证了此模型用于海底电缆载流量分析计算的正确性;同时,实测比对试验结果可用于完善并修正导体温度计算和载流量计算模型,提高计算的精确度。

c. 根据不同环境因素对直流海底电缆载流量的影响分析结论发现,在海底电缆的实际运行维护阶段,根据不同的运行环境合理地调度输电线路的负荷电流,对保障海底电缆的安全可靠运行有重要影响。

## 参考文献:

- [1] 应启良. 我国发展直流海底电力电缆的前景[J]. 电线电缆, 2012(3):1-7.  
YING Qiliang. The prospect of development of DC submarine cables in China[J]. Electric Wire & Cable, 2012(3):1-7.
- [2] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2593-2612.  
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9):2593-2612.
- [3] 吕安强, 寇欣, 尹成群, 等. 三芯海底电缆中复合光纤与导体温度关系建模[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18):59-65.  
LÜ Anqiang, KOU Xin, YIN Chengqun, et al. Modeling of temperature relation between optical fiber and conductor in 3-core submarine power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18):59-65.
- [4] YE Yincan. Development of submarine optic cable engineering in the past twenty years[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(1):1-10.
- [5] WORZYK T. Submarine power cables design, installation, repair, environmental aspects[M]. New York, USA: Springer Dordrecht Heidelberg, 2009:17-70.
- [6] 张建民, 张洪亮, 谢书鸿, 等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆在中国海洋风电建设中的典型应用和发展前景[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8):25-33.  
ZHANG Jianmin, ZHANG Hongliang, XIE Shuhong, et al. Typical application and development prospect of XLPE insulated submarine cable for offshore wind farm in China[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8):25-33.
- [7] 钟力生, 任海洋, 曹亮, 等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3473-3489.  
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3473-3489.
- [8] 赵健康, 赵鹏, 陈铮铮, 等. 高压直流电缆绝缘材料研究进展评述[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3490-3503.  
ZHAO Jiankang, ZHAO Peng, CHEN Zhengzheng, et al. Review on progress of HVDC cables insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3490-3503.
- [9] 段佳冰, 尹成群, 吕安强, 等. 基于 IEC60287 和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器, 2014(1):1-6.  
DUAN Jiabing, YIN Chengqun, LÜ Anqiang, et al. Analysis method for temperature of high voltage submarine cable based on IEC60287 and finite element[J]. High Voltage Apparatus, 2014(1):1-6.
- [10] 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 光电复合海缆中光纤与导体温度关系的有限元分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4):91-96.  
LÜ Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Finite element analysis method for temperature relationship between conductor and optical fiber in optic-electric composite submarine cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4):91-96.
- [11] 刘毅刚, 罗俊华. 电缆导体温度实时计算的数学方法[J]. 高电压技术, 2005, 31(5):52-54.  
LIU Yigang, LUO Junhua. Mathematical method of temperature calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5):52-54.
- [12] 赵健康, 雷清泉, 王晓兵, 等. 复杂运行条件下交联电缆载流量研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3123-3128.  
ZHAO Jiankang, LEI Qingquan, WANG Xiaobing, et al. Experimental research on ampacity of extruded power cable under complex operating condition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):3123-3128.
- [13] 张松光, 郭旭敏, 张畅生, 等. 不同敷设环境下高压直流海缆的温度场分析[J]. 广东电力, 2016, 29(1):102-107.  
ZHANG Songguang, GUO Xumin, ZHANG Changsheng, et al. Analysis for temperature field of HVDC submarine cable in different laying environment[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(1):102-107.
- [14] 刘畅. 电力电缆载流量与温度场计算软件设计[D]. 杭州:浙江大学, 2015.  
LIU Chang. Calculation software design on ampacity and temperature field of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [15] REDDY C C, RAMU T S. On the computation of electric field and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6):1236-1244.
- [16] KOCAR I, ERTAS A. Thermal analysis for determination of current carrying capacity of PE and XLPE insulated power cables using finite element method[C]//Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2004:905-908.
- [17] 陈志龙. 基于有限元法的地下电缆温度场的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.  
CHEN Zhilong. Study on temperature field of underground power cable based on the finite element method[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [18] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.  
LUO Tao. The study on the temperature field and ampacity calculation of power cables[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [19] 郝艳捧, 黄吉超, 阳林, 等. 高压直流电缆稳态载流量解析计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4):1283-1288.  
HAO Yanpeng, HUANG Jichao, YANG Lin, et al. Analytical calculation method of steady-state current capacity of HVDC cables[J]. Power System Technology, 2016, 40(4):1283-1288.
- [20] 郑明, 胡倩楠, 刘刚. 110 kV 海底电缆不同敷设方式下载流量的对比分析[J]. 电气应用, 2014(23):146-149.  
ZHENG Ming, HU Qiannan, LIU Gang. Comparative analysis for ampacity of 110 kV submarine cable in different laying conditions[J]. Electrotechnical Application, 2014(23):146-149.
- [21] 方晓宝. 地下电缆载流量评估影响因素数值分析[J]. 浙江电力, 2011, 30(6):42-46.  
FANG Xiaobao. Numeric analysis of influencing factors on ampacity evaluation of underground power cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(6):42-46.
- [22] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11):2801-2806.  
ZHANG Yao, ZHOU Xin, NIU Haiqing, et al. Theoretical calculation and experimental research on thermal time constant of single core ca-

- bles[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2801-2806.
- [23] NEHER J H. The temperature rise of buried cables and pipes[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1949, 68(1): 9-21.
- [24] 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.
- [25] 梁永春, 赵静, 闫彩红. 沟槽电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3048-3053.  
LIANG Yongchun, ZHAO Jing, YAN Caihong. Numerical calculation of temperature field and ampacity of power cables in channel[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3048-3053.
- [26] 梁永春, 李彦明, 李延沐, 等. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 34-38.  
LIANG Yongchun, LI Yanming, LI Yanmu, et al. Numerical method to calculate the transient temperature field and shortterm ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 34-38.
- [27] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 81-104.
- [28] 邱超. 双回路单芯电力电缆不同敷设与排列方式下温度场与载流量计算[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
QIU Chao. Calculations of thermal field and ampacity for two circuit single-core power cables in different laying modes and arrangements[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [29] DAI D, HU M, LUO L. Calculation of thermal distribution and ampacity for underground power cable system by using electromagnetothermal coupled model[C] // Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2014: 303-306.
- [30] 姚周飞, 贺林. 基于有限元法的电力电缆载流量计算[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2910-2913.  
YAO Zhoufei, HE Lin. Calculation of power cable current-carrying capacity based on finite element method[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2910-2913.
- [31] 梁永春, 李延沐, 李彦明, 等. 利用模拟热荷法计算地下电缆稳态温度场[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 129-134.  
LIANG Yongchun, LI Yanmu, LI Yanming, et al. Calculation of the static temperature field of underground cables using heat charge simulation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 129-134.
- [32] 何潮洪, 冯霄. 化工原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 191-192.

#### 作者简介:



刘云鹏(1976—), 男, 安徽六安人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为特高压输电技术、电气设备在线检测技术和外绝缘技术 (E-mail: liuyunpeng@ncepu.edu.cn);

许自强(1992—), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘与在线检测及诊断技术、高压直流电缆输电技术 (E-mail: xzq11251992@163.com);

陈铮铮(1986—), 男, 湖北武汉人, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电缆及其高电压绝缘技术 (E-mail: chenzhengzheng@epri.sgcc.com.cn);

刘贺晨(1989—), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 主要研究方向为高压电力电缆局部放电检测与定位技术及高压直流电缆输电技术 (E-mail: tlk1238@163.com)。

### Simulation and experiment of ampacity characteristics for $\pm 160$ kV DC XLPE submarine cable

LIU Yunpeng<sup>1,2</sup>, XU Ziqiang<sup>1</sup>, CHEN Zhengzheng<sup>3</sup>, LIU Hechen<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Nan'ao  $\pm 160$  kV multi-terminal flexible DC power transmission project uses the high-voltage and large-length extruded insulated DC cable system firstly in China, while there is no operation and maintenance experience of 160 kV DC cable project at present. In order to provide technical support for the customization of the online monitoring system and the control of operational limits, it's necessary to study the ampacity characteristics of DC XLPE cable. Through the study of the cooling principle of DC cable in different laying environment, the thermal field model of  $\pm 160$  kV DC XLPE submarine cable with protective tubes laying underground is established by using the professional finite element software COMSOL Multiphysics, to simulated the temperature distribution and calculate the ampacity. The cable load flow tests are carried out in the test site to verify the reliability of the simulation model, whose results are discussed to obtain the ampacity characteristics of DC submarine cables.

**Key words:** DC submarine cable; ampacity; finite element method; simulation and calculation; field test