

# 高压直流 XLPE 绝缘电缆载流量的数值算法及特性分析

赵 鹏<sup>1</sup>, 关健昕<sup>1</sup>, 欧阳本红<sup>1</sup>, 黄凯文<sup>1</sup>, 赵健康<sup>1</sup>, 严有祥<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司 电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 国网福建省电力公司厦门供电公司, 福建 厦门 361006)

**摘 要:** 载流量是电缆传输能力的重要指标, 直接影响高压直流电缆的运行可靠性和经济性。根据直流电缆绝缘层中电场分布的特点, 提出了基于等效电导率的绝缘层内外侧电场分布的解析计算方法, 并以±535 kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆为例, 同时考虑电缆导体最高运行温度和绝缘层最大允许温差, 得到不同运行工况下高压直流电缆的负载控制域。结果表明: 电-热场解耦方法能有效分析直流电缆的载流量和应用特性, 其中绝缘层最大温差是限制临界环境温度以下直流电缆载流量的核心因素, 在此临界环境温度下, 提升导体最高运行温度对载流量影响有限, 而优化绝缘材料耐电性能和电缆结构才是提升载流量的关键。

**关键词:** 高压直流电缆; 载流量; 等效电导率; 临界环境温度; 负载控制域

中图分类号: TM215; TM246 DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.014

## Numerical algorithm and characteristic analysis on current-carrying capacity of HVDC XLPE insulated cable

ZHAO Peng<sup>1</sup>, GUAN Jianxin<sup>1</sup>, OUYANG Benhong<sup>1</sup>,  
HUANG Kaiwen<sup>1</sup>, ZHAO Jiankang<sup>1</sup>, YAN Youxiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. Xiamen Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Xiamen 361006, China)

**Abstract:** Current-carrying capacity is an important indicator of cable transmission capacity, which directly affects the operation reliability and economy of HVDC cables. According to the electric field distribution characteristics in the insulation layer of DC cable, an analytical calculation method of the electric field distribution inside and outside the insulation layer based on the equivalent conductivity was proposed. Taking a ±535 kV XLPE insulated DC cable as example, considering the highest operating temperature of cable conductor and the maximum allowable temperature difference of insulation layer, we obtained the load control domains of the HVDC cable under different operating conditions. The results show that the current-carrying capacity and application characteristics of HVDC cables can be analyzed by the electric thermal field decoupling method effectively, and the maximum temperature difference of insulation layer is the core factor limiting the current-carrying capacity of DC cable below critical ambient temperature. Under the critical ambient temperature, raising the highest operating temperature of conductor has limited influence on the current-carrying capacity, while optimizing the electrical resistance of insulating materials and cable structure is the key to improving the current-carrying capacity.

**Key words:** HVDC cable; current carrying capacity; equivalent conductivity; critical ambient temperature; load control region

## 0 引言

直流输电技术在大型新能源发电并网、各大电力系统互联以及海岛供电等方面具有很大优势, 使得直流输电装备得到了长足的发展<sup>[1]</sup>。高压直流电缆作为直流输电系统中的重大装备, 是支撑向负荷

中心供电和长距离跨海输电的重要部分<sup>[2-4]</sup>。载流量是电缆传输能力的重要指标<sup>[5-7]</sup>, 直接影响高压直流电缆的运行可靠性和经济性。

长期运行导体温度是决定电缆载流量的核心因素, 研究人员对电缆传热模型进行了大量研究, 通过电缆表面温度计算导体温度, 为电缆运行载流量控制提供依据。如刘刚等<sup>[8]</sup>通过红外热像仪测量

电缆表面温度,进而建立传热数学模型,反演计算导体温度等。近年来,数值分析的发展为计算电缆温度分布提供了便利<sup>[9-11]</sup>,其中利用有限元法计算温度场已较为成熟<sup>[12]</sup>。

与交流电缆不同,直流电压下电缆中的电场由绝缘材料的电导率决定,受电场和温度影响,XLPE 绝缘材料电导率的变化可能达到 2~3 个数量级,会直接导致电场分布的反转。因此,直流电缆中的电场分布是决定载流量计算的重要因素,需要考虑电缆的实际运行条件和电-热场耦合计算<sup>[13]</sup>。郝艳捧等<sup>[14]</sup>同时考虑了导体最高长期允许温度和绝缘层最大允许温差两个因素,并给出了两种条件下的稳态载流量曲线;阳林等<sup>[15]</sup>通过有限元法仿真研究了直流电缆温度分布和载流量的关系;王雅妮等<sup>[16]</sup>研究了多种敷设环境下高压直流电缆的温度分布。但是,有限元法需要建立复杂的直流电缆截面模型,且有大量数据冗余,无法与现有的载流量分析系统相容,在应用上存在很大的局限性,需要提出更加简单有效的电场分布解析计算方法。

本研究基于直流电缆绝缘泄漏电流连续性原理,根据电场分布的特点,引入等效电导率解决绝缘层电场分布计算的电-热场耦合问题;以工程应用的±535 kV XLPE 绝缘直流电缆为例,同时考虑电缆导体最高运行温度和绝缘层最大允许温差,计算不同条件下直流电缆负载能力和基于临界环境温度的直流电缆载流量控制域,并分析载流量的影响因素和优化提升方向。

## 1 电场计算模型

### 1.1 直流电缆计算模型

高压电缆屏蔽的电导率远大于 XLPE 绝缘材料的电导率,设置内屏蔽与导体等电位,外屏蔽为地电位,构建如图 1 所示的计算模型,以求解单一介质 XLPE 绝缘中的电场分布。其中,电缆导体半径为  $r_1$ ,绝缘层半径为  $r_2$ ,电压为  $U_0$ ,XLPE 绝缘的电导率为  $\gamma$ ,介电常数为  $\epsilon$ 。由于正常运行时,电缆中泄漏电流密度很小,可以忽略泄漏电流引起的绝缘层温度变化。

文献[17]中提出了在电导率与温度  $T$  成指数函数时,绝缘层中电场的推算过程。研究表明,XLPE 绝缘材料的电导率与温度的倒数  $1/T$  成指数函数<sup>[18]</sup>,如式(1)所示。

$$\gamma(E,T) = ae^{\left(\frac{-\varphi q}{k_b T}\right)} e^{b\sqrt{E}} \quad (1)$$

式(1)中: $\gamma$ 为电导率,S/m; $T$ 为温度,K; $E$ 为电场强度,V/m; $a$ 为与材料有关的常数,S/m; $b$ 为场强系

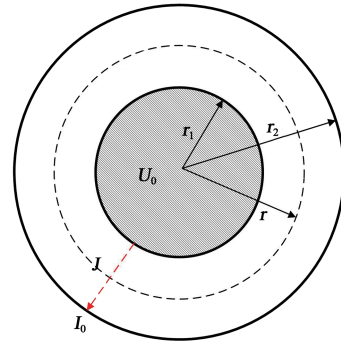


图1 高压直流电缆计算模型

Fig.1 Calculation modelling of HVDC cable

数, $\sqrt{m/V}$ ; $\varphi$ 为活化能,eV; $q$ 为电子电荷量,C; $k_b$ 为玻尔兹曼常数,J/K。设电导率温度系数  $c$  为式(2)。

$$c = \frac{\varphi q}{k_b} \quad (2)$$

则可得到式(3)。

$$\gamma(E,T) = ae^{\left(\frac{c}{T}\right)} e^{b\sqrt{E}} \quad (3)$$

设导体温度为  $T_1$ ,外屏蔽层温度为  $T_2$ ,绝缘层温差为  $\Delta\theta_i$ ,则绝缘内部温度分布可表示为式(4)<sup>[14]</sup>。

$$T = T_1 - \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2) = T_1 - \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \Delta\theta_i \quad (4)$$

根据温度分布、电导率函数和电缆结构,可以构建直流电缆电场数值分析基础模型。

### 1.2 电导率模型

采用两种高压直流 XLPE 绝缘料开展电导率特性分析,分别为绝缘料 A 和绝缘料 B。电导率测试采用±535 kV 直流电缆绝缘先环切成厚度为 0.2 mm 的长条,再裁剪成尺寸为 100 mm×100 mm×0.2 mm 的片状试样。为消除切片过程中引入的机械应力,需对试样进行预处理,即在 70℃ 下恒温干燥 24 h,然后在环境温度下自然冷却。

直流电导率测试采用三电极系统,以防止测量时表面电流对实验结果产生影响。分别在 10、20、30、50 kV/mm 电场强度下选取 6 个不同的温度测试点,开展绝缘试样的电导率测量,记录试样在施加电压 30 min 过程中的电流曲线。根据电流测量结果的中值,结合施加电压与电极尺寸计算出体积电导率。图 2 为不同电场下两种绝缘材料的电导率及根据公式(3)得到的拟合曲线。

从图 2 可以看到,不同电场下拟合曲线与测试结果比较相符,拟合相关系数的平方值  $R^2$  均不小于 0.98,同时得到电导率函数中各项系数拟合结果,如表 2 所示。从表 2 可以看出,绝缘料 A 的电导率温

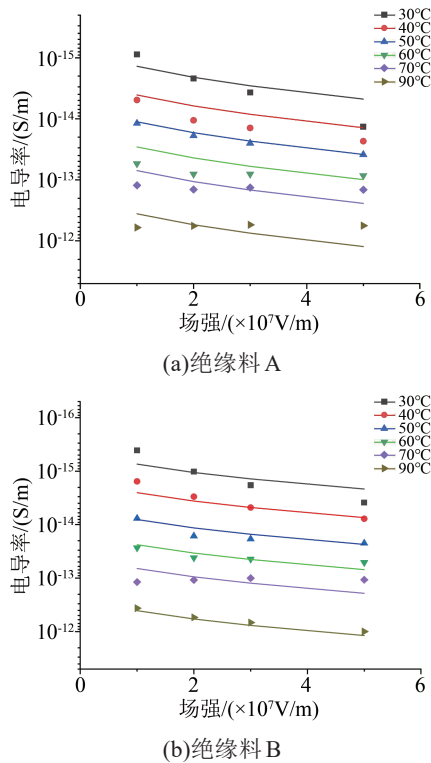


图2 XLPE 绝缘材料的电导率拟合曲线

Fig.2 Conductivity fitting curves of XLPE insulating materials

表2 XLPE 绝缘材料的电导率拟合结果

Tab.2 Conductivity fitting results of XLPE insulating materials

拟合参数	绝缘料 A	绝缘料 B
$a/(S/m)$	0.226 594 89	16.912 516 89
$b/(×10^{-4}(m/V)^{-1/2})$	3.16	2.74
$c/(×10^4K)$	1.02	1.17

度系数  $c$  较小,表明采用绝缘料 A 的直流电缆绝缘层电场分布受温度的影响更小。

### 1.3 电缆传热模型

稳定运行条件下,单芯直流电缆本体和周围媒介的传热过程可用热路模型等效,则可得直流电缆的载流量计算公式如式(5)所示。

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a}{R_{DC}(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)}} \quad (5)$$

式(5)中: $I$ 为直流电缆稳态载流量,A; $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 和  $H_4$ 分别为直流电缆绝缘层、阻水层、外护层和外部环境的等效热阻<sup>[9]</sup>, $TQ/m$ ; $R_{DC}$ 为单位长度导体在最高长期允许温度下的直流电阻, $\Omega/m$ ; $\theta_c$ 和  $\theta_a$ 分别为电缆导体温度和环境温度, $^{\circ}C$ 。

直流电缆运行中只考虑导体损耗,而导体损耗产生的热流向外传输过程中,在不同电缆结构层上产生温差,各层温差取决于导体发热功率和电缆结

构层热阻。因此,稳态载流量可以通过绝缘温差和绝缘层的热阻进行计算,等效计算公式如式(6)所示。

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_i}{R_{DC}H_1}} \quad (6)$$

结合式(6)可以认为,直流电缆稳态载流量的平方  $I^2$  与绝缘层温差成正比,即绝缘最大温差可以决定直流电缆的载流量。

## 2 绝缘电场与最大温差分析

以工程中应用的 $\pm 535$  kV 直流电缆为例,分析其电场分布和载流量特性。 $\pm 535$  kV 直流电缆的导体截面为  $3\ 000\ mm^2$ ,平均场强为  $17.83\ kV/mm$ ,绝缘设计场强为  $23.6\ kV/mm$ 。电缆其他结构尺寸及热阻系数见表 1。

表1  $\pm 535$  kV 直流电缆结构尺寸及热参数

Tab.1 Structure and thermal parameters of the  $\pm 535$  kV HVDC cable

结构名称	厚度/mm	外径/mm	热阻系数/(K·m/W)
导体	—	64.0 $\pm$ 1.0	1/398
内屏	2.5 $\pm$ 0.2	69.0 $\pm$ 1.0	3.5
绝缘	30	129.0 $\pm$ 1.0	3.5
外屏	1.5 $\pm$ 0.2	132.0 $\pm$ 1.0	3.5
缓冲层	4.0(近似值)	140.0 $\pm$ 2.0	10
金属护套	4.9	150.8 $\pm$ 2.0	1/236
外护套	4.7	160.2 $\pm$ 2.0	3.5

### 2.1 等效电导率

通过有限元仿真得到不同绝缘层温差下,基于绝缘料 A 的 $\pm 535$  kV 高压直流电缆(简称“ $A$  绝缘电缆”)本体绝缘中电场分布,如图 3 所示。

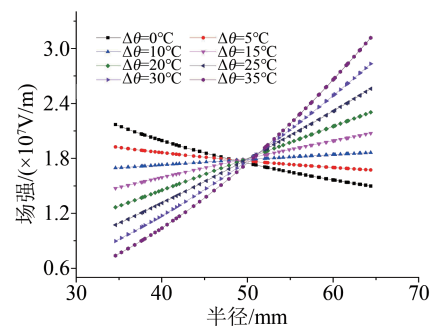


图3 不同绝缘层温差下 $\pm 535$  kV 电缆绝缘层中场强分布

Fig.3 Electric field distribution in  $\pm 535$  kV cable under different temperature gradients of insulation layer

在不同绝缘层温差下,直流电缆中电场最大值出现在绝缘内、外侧,而绝缘层中间的电场几乎为定值,且约等于绝缘层的平均场强  $E_{avg}$ 。则根据式

(7)~(8)所示泄漏电流连续性条件,可得到绝缘泄漏电流值为式(9)。

$$I_0 = 2\pi rJ \tag{7}$$

$$J(r) = E(r)\gamma(E,T) \tag{8}$$

$$I_0 = 2\pi rJ(r) = 2\pi r_{avg} E_{avg} \gamma_{avg} \tag{9}$$

式(9)中: $\gamma_{avg}$ 为等效电导率,代表在绝缘层中间点上的电导率; $r_{avg}=1/2(r_1+r_2)$ 。

等效电导率模型可以简化绝缘层电场分布的计算过程,只需关注绝缘层温度 $T$ 的变化,则电导率函数模型可以表示为式(10),其中 $a'=ae^b\sqrt{E_{avg}}$ ,可以实现电-热均解耦计算。

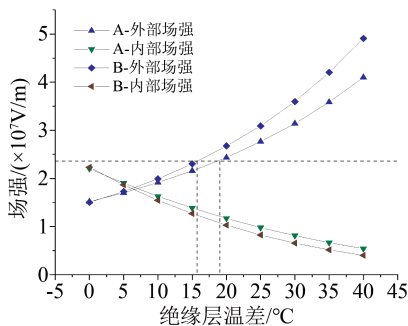
$$\gamma_{avg}(T) = a'e^{\frac{c}{T}} \tag{10}$$

根据温度分布计算公式(4)和泄漏电流连续性计算公式(9),可以得到绝缘层中间点上的温度 $T_{avg}$ ,由此得到不同温度梯度下绝缘层内、外侧的电场强度。

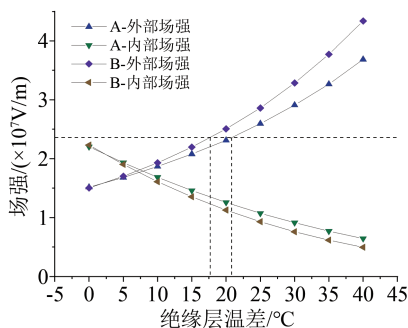
### 2.2 绝缘电场和最大温差

图4为导体最高运行温度分别为70℃和90℃时,不同温差下绝缘层内、外侧的电场分布。从图4可以看出,基于绝缘料B的电缆内外侧场强随绝缘层温差的变化更大。

实际运行中当直流电缆绝缘层的电场强度最大值等于设计场强时,绝缘层存在最大温差 $\Delta\theta_{i,max}$ 。



(a)70℃



(b)90℃

图4 不同绝缘层温差下电缆绝缘层内外侧电场

Fig.4 Electric field on the inside/outside of the insulation layer under different temperature gradients of insulation layer

则可根据图4,得到不同导体温度下直流电缆的绝缘最大温差如表3所示。

表3 设计场强下电缆绝缘层最大温差

Tab.3 Maximum temperature difference of cable insulation layer under design field strength

℃		
导体最高温度	绝缘料A	绝缘料B
70	18.5	15.7
90	21.5	17.7

### 3 直流电缆载流量特性

直流电缆载流量主要取决于导体最高工作温度 $\theta_{c,max}$ 和绝缘B最大温差 $\Delta\theta_{i,max}$ ,下面将分别开展不同导体最高温度下电缆的载流量特性分析。

#### 3.1 负载控制域

直流电缆负载安全控制域如图5中阴影部分所示<sup>[14]</sup>,两条限制曲线和环境温度组成的二维平面上限定了电缆运行中稳态负载的允许范围。在安全控制域内,导体温度和绝缘层温差均满足设定条件。在非安全域I内,导体温度较低,但绝缘层温差超过了允许值;在非安全域II内,导体温度和绝缘层温差都大于允许值;在非安全域III内,导体温度超过了允许值。

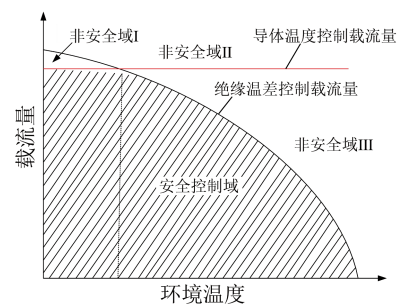


图5 高压直流 XLPE 绝缘电缆负载控制域

Fig.5 Load control domain of HVDC XLPE cable

直流电缆运行中存在稳态负载的临界控制点,其由临界环境温度 $\theta_{a,c}$ 和最大负载能力 $I_{max}$ 共同确定,即 $(\theta_{a,c}, I_{max})$ ,在临界环境温度以下载流量由绝缘层温差决定;在临界环境温度以上,载流量由导体温度决定。负载控制域的面积决定了直流电缆的输送能力和环境适应性,是评价直流电缆载流量特性最直观的参数。

此外,在电力电缆工程运行中,载流量是综合考虑最高环境温度和导体最高长期运行温度得到的电缆最大负载能力。通常空气中敷设电缆的最高环境温度为40℃,土壤中直埋敷设电缆的最高环境温度为25℃<sup>[20]</sup>。

### 3.2 导体最高温度为 70℃ 时的载流量

导体最高温度为 70℃ 的直流电缆负载控制域如图 6 所示。从图 6 可以看出,在导体最高运行温度为 70℃ 时,A 绝缘电缆的临界控制点为(35.4℃, 2 710 A),B 绝缘电缆的临界控制点为(42.5℃, 2 432 A),差异主要来源于绝缘材料的电导率温度系数不同导致的绝缘最大温差的不同。B 绝缘电缆的电导率温度系数更大,使得场强出现较大反转,更小的绝缘温差限制了直流电缆的最大负载能力。

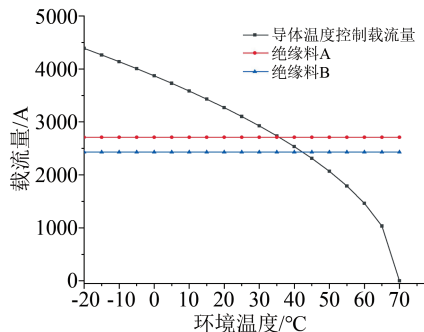


图 6 导体最高温度为 70℃ 的直流电缆负载控制域

Fig.6 Load control domain of DC cable with maximum conductor temperature of 70℃

分析可知,A 绝缘电缆的临界环境温度为 35.4℃,低于工程运行中 40℃ 的要求,因此稳态载流量略小于  $I_{\max}$ ,为 2 500 A;B 绝缘电缆的临界环境温度为 42.5℃,略高于工程运行中 40℃ 的要求,因此稳态载流量即可设定为  $I_{\max}$ ,即 2 432 A。

### 3.3 导体最高温度为 90℃ 时的载流量

导体最高温度为 90℃ 的直流电缆负载控制域如图 7 所示。从图 7 可以看出,在导体最高运行温度为 90℃ 时,A 绝缘电缆的临界控制点为(54.2℃, 2 705 A),B 绝缘电缆的临界控制点为(60.0℃, 2 471 A)。根据表 3,导体最高温度为 90℃ 时,绝缘最大温差较导体最高温度为 70℃ 时更高,但计算结果显示最大负载能力  $I_{\max}$  与 70℃ 时差别不大。这是由于导体电阻变大会增加线路损耗,限制了电缆传输的最大负载能力  $I_{\max}$ 。

与导体最高温度为 70℃ 的情况相比,导体最高温度为 90℃ 时临界环境温度变化很大,表明直流电缆在环境温度为 54℃ 以下时,最大负荷均受温度梯度限制,即载流量为最大负荷能力  $I_{\max}$ ,而这种传输能力显然是不够经济的,实际工程中,直流电缆也很难应用于为 40℃ 以上的环境温度。

### 3.4 讨论

直流电缆载流量的确定需要综合考虑临界环境温度和最大运行环境温度。其中,临界环境温度

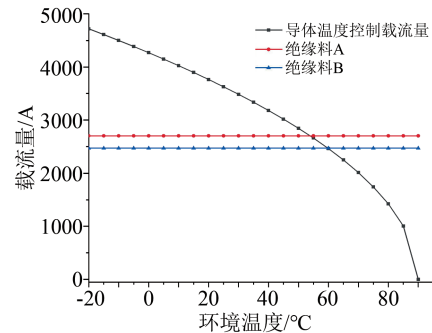


图 7 导体最高温度为 90℃ 的直流电缆负载控制域

Fig.7 Load control domain of DC cable with maximum conductor temperature of 90℃

$\theta_{a,c}$  可通过数值计算方法准确得到,是表征电缆最大负载能力的重要特征参数。对于隧道敷设的直流电缆,如果临界环境温度  $\theta_{a,c} < 40^\circ\text{C}$ ,则稳态载流量  $I$  小于最大负载能力  $I_{\max}$ ;如果临界环境温度  $\theta_{a,c} \geq 40^\circ\text{C}$ ,则稳态载流量  $I$  等于最大负载能力  $I_{\max}$ 。

临界环境温度  $\theta_{a,c}$  取决于导体最高运行温度。按照 IEC 62895:2017 要求,±535 kV 直流电缆的导体运行最高温度由制造商申明,目前主要包括 70℃ 和 90℃ 两种,根据分析,将导体最高运行温度提高 20℃ 时,临界环境温度  $\theta_{a,c}$  几乎同样提升了 20℃,使得 A 绝缘电缆可以在 40℃ 条件下达到最大负载能力  $I_{\max}$ ,载流量受绝缘层最大温差控制的环境温度范围增大,但是总体上  $I_{\max}$  并未改变,其关键在于绝缘最大温差是由设计场强和电场分布共同决定的,取决于绝缘材料的介电性能,并不随导体的最高运行温度升高而发生较大变化。

如果不改变绝缘材料性能,通过导体最高运行温度难以提升直流电缆的载流量。对于 ±535 kV 直流电缆,当导体最高运行温度由 70℃ 提升至 90℃ 时,单位长度电缆导体的直流电阻  $R_{DC}$  从  $6.86 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$  提升至  $7.31 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ ,在同样的负荷条件下,增加的导体损耗也需要更大的绝缘层温差,此外,当导体最高温度提高后,高温高场强下直流电缆绝缘电导机制更容易由体(Poole-Frenkel)效应转变到电极(Schottky)效应<sup>[21]</sup>,会增加绝缘层电场的反转。从经济性考虑,仅提升直流电缆最高运行温度对于提升载流量作用有限。

直流电缆设计场强受绝缘材料的长期老化寿命指数  $n$  影响,按照 40 年的长期运行要求,电缆本身的绝缘缺陷,包括气隙、杂质以及界面突起等均会使寿命指数降低,因此提升绝缘设计场强的关键在于提升绝缘材料的耐电性能。直流电缆的电场分布由绝缘材料的电导率温度特性决定,优化绝缘

材料的电导率温度特性,改善绝缘层温差下的场强反转,可以保证在同样的设计场强下允许更大的绝缘层温差。对于实际工程,建议将直流电缆负载控制域和临界控制点纳入供应商应当掌握的关键参数中<sup>[22]</sup>,而且临界环境温度 $\theta_{a,c}$ 越接近敷设最大环境温度,则对电缆运行和设计越经济。

#### 4 结论

(1)基于直流电缆绝缘层中等效电导率,能够实现电导率函数温度、场强特性的解耦分析,得到绝缘层电场阈值和最大允许温差,有效评价电缆绝缘材料的介电性能和设计场强。

(2)直流电缆负载控制域可以直观地表示直流电缆的输送能力,其面积决定了直流电缆的环境适应性;临界控制点 $(\theta_{a,c}, I_{max})$ 是表征直流电缆最大负载能力的重要参数,是评价电缆设计和运行中负载能力经济性的重要指标。

(3)对于 $\pm 535$  kV 直流电缆,导体最高温度从 $70^{\circ}\text{C}$ 提升至 $90^{\circ}\text{C}$ 时,临界环境温度 $\theta_{a,c}$ 升高,但是最大负载能力 $I_{max}$ 几乎不变,即通过提升导体最高温度改变了直流电缆对运行环境的适应性,能使电缆在更高的环境温度范围内运行,但对增大直流电缆输送容量的作用比较有限。

(4)直流电缆载流量提升的核心是同时优化绝缘的设计场强和电场分布,其中改善绝缘材料的电导率温度特性能减少绝缘温差下的电场反转,提升绝缘材料的设计场强能保证直流电缆在更大绝缘允许温差下可靠运行。

#### 参考文献:

- [1] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
- [2] 赵健康,陈铮铮.国内外海底电缆工程研究综述[J].华东电力,2013,39(9):1477-1480.
- [3] 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.
- [4] 张翀,查俊伟,王思蛟,等.高压直流电缆绝缘材料的发展与展望[J].绝缘材料,2016,49(2):1-9.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈铮铮,赵鹏,赵健康,等.商用直流电缆料采用不同质量份数纳米MgO改性的选型研究[J].高电压技术,2018,44(5):1435-1442.
- [8] 刘刚,雷鸣,阮班义,等.考虑轴向传热的单芯电缆线芯温度实时计算模型研究[J].高电压技术,2012,38(8):1877-1883.
- [9] 姚铮,于笑辰,葛雷,等.高压电缆集群载流量优化研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2020(4):30-34.
- [10] 马人凤,朱永华,吴建东,等.超高压直流电缆的国产化研究进展[J].绝缘材料,2016,49(11):1-8.
- [11] 卞佳音,李永兰,单鲁平等.500kV 电力电缆稳态热路模型分析及载流量计算[J].绝缘材料,2019,52(9):96-101.
- [12] 刘英,肖阳,刘松华.隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J].高压电器,2019,55(8):123-130.
- [13] ALBERTINI M, BAREGGI A, CAIMI L, et al. Development and high temperature qualification of innovative 320kV DC cable with superiorly stable insulation system[C]//The 9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: Jicable,2015:A7.3.
- [14] 郝捧捧,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.
- [15] 阳林,邱伟豪,陈云,等. $\pm 500$ kV 直流电缆负荷循环系统温度控制仿真研究[J].高压电器,2020,56(1):155-161.
- [16] 王雅妮,张洪亮,吴建东,等.不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J].绝缘材料,2017,50(7):71-78.
- [17] 何淼,GEORGE C.描述高压直流电缆绝缘材料电导率的公式比较[J].南方电网技术,2016,10(4):78-84.
- [18] 王霞,王陈诚,孙晓彤,等.高温高场强下XLPE及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J].中国电机工程学报,2016,36(7):2008-2017.
- [19] 赵健康,樊友兵,王晓兵,等.高压电力电缆金属护套下的热阻特性分析[J].高电压技术,2008,34(11):2483-2487.
- [20] 电力行业电力电缆标准化技术委员会.电力电缆线路运行规程:DL/T 1253—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.
- [21] 王霞,王陈诚,孙晓彤,等.高温高场强下XLPE及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J].中国电机工程学报,2016,36(7):2008-2017.
- [22] 赵鹏,欧阳本红,陈铮铮,等.直流电缆试验标准体系分析及 $\pm 535$ kV 电缆系统试验中关键问题[J].中国电力,2021,54(4):10-18,25.

收稿日期:2022-01-23 修回日期:2022-03-10

作者简介:赵鹏(1993-),男(汉族),甘肃会宁人,工程师,研究方向为直流电缆和聚丙烯绝缘电缆评估;赵健康(1963-),男(汉族),陕西渭南人,教授级高级工程师,研究方向为电力电缆运行和评价技术。