

# 基于暂态电热场特性的高压直流电缆线路动态增容能力评估

刘潇镁, 刘 英, 李文清  
(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 电力需求的增长和系统容量的提升对输电电缆的传输容量和运行可靠性提出了更高的要求, 有效利用高压直流(high voltage direct current, HVDC)电缆线路的动态增容潜力对于实现电力资源优化配置具有重要意义。通过有限元分析(finite element analysis, FEA)方法建立了不同敷设环境中高压直流电缆线路的暂态热场及电场模型, 仿真分析了电缆在多种典型动态负荷下的温度分布及绝缘电场特性, 研究发现: 相比于架空及土壤直埋敷设, 隧道敷设的 HVDC 电缆系统热响应时间常数达到数百小时, 因此具有更好的动态增容能力。论文以隧道中敷设为例, 通过相应 FEA 模型反演计算了不同初始负荷与应急时长下直流电缆的允许最大过负荷电流, 给出了针对 HVDC 电缆线路短时动态增容能力的评估方法, 并对直流电缆线路动态增容过程中的暂态电热特性进行了分析。结果表明: 初始负荷率高, 应急持续时间长, 绝缘电导率温度敏感性强的 XLPE 直流电缆在动态增容过程中场强变化幅度大, 应予以特别关注; 初始负荷率不超过 50% 的隧道敷设双极直流电缆线路, 单级可在 1.5 倍额定电流下安全运行 2 h。该结果可为工程中 HVDC 电缆线路动态增容与优化调度提供理论指导。

**关键词:** 高压直流电缆线路; 交联聚乙烯绝缘; 动态增容; 暂态电热场分析; 允许最大过负荷

## Dynamic Capacity Expansion Evaluation for HVDC Cable Lines Based on Transient Electrical and Thermal Field Characteristics

LIU Xiaomei, LIU Ying, LI Wenqing  
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The growth of power supply demands and the improvement of power system capacity have put forward a higher requirements for the transmission capacity and operation reliability of cables in power transmission and distribution network. It is of great significance to effectively use the dynamic capacity expansion potential of high-voltage direct-current (HVDC) cable lines for the optimal allocation of electric power resources. In this paper, the finite element analysis (FEA) method is used to establish the transient thermal and electric field models of HVDC cables laid in different environments, and the temperature distribution and insulation electric field characteristics of cables under typical dynamic loads are simulated and analyzed. The research reveals that, compared with the systems laid in air or buried in soil, the HVDC cable system laid in a tunnel has the thermal response time constant of several hundred hours, and thus has the highest dynamic capacity expansion capability. Taking the cable laid in a tunnel as a case study, we calculated the allowable maximum overload currents of it under different initial load rates and permitted emergency durations through an iterative inversion process based on the corresponding FEA model. In addition, we proposed an evaluation technique for the short-term dynamic expanded capacity of HVDC cable lines, and analyzed the transient electric and thermal characteristics in the overload duration. The results indicate that, for HVDC XLPE cables with high initial load rates, long emergency durations and high temperature dependencies of the insulation conductivity, significant electric field changes will take place during dynamic capacity expansion, and thus should be given specific attention. For bipolar DC cable lines in tunnels with an initial load rate less than 50%, any one pole can safely run with 150% rated current for 2 hours. The findings of this paper provide theoretical guidance for dynamic capacity expansion and optimization scheduling of HVDC cable lines.

**Key words:** HVDC cable lines; XLPE insulation; dynamic capacity expansion; transient electric and thermal field analysis; allowable maximum overload current

## 0 引言

高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电技术是目前实现远距离、大容量、低损耗、高效率的电力传输, 以及风力、水力、太阳能发电等可再生新能源并网的最佳选择, 近年来得到了广泛应用和关注, 国内外直流输电工程数量逐年递增<sup>[1-3]</sup>。电力供应需求的增长和电能传输距离的增加, 对高压直流电缆的电压等级和传输容量提出了更高要求<sup>[4-6]</sup>。充分利用电缆线路负荷传输能力, 提高线路的输电效率, 不仅能为直流电缆应急负荷运行控制策略提供有效的理论指导, 对实现电力资源优化配置也具有重要意义<sup>[7]</sup>。

直流电缆线路的输送容量是由导体线芯的最高允许温度和绝缘最大允许场强限制的<sup>[8]</sup>。在实际运行过程中, 电缆会经受负荷波动以及周围环境温度变化等暂态工况, 例如风电等新能源接入引起的波动负荷, 检修或故障时负荷的短时转移以及外部热源或季节性气候导致的敷设环境温度变化等, 电缆的实际传输容量也是动态变化的<sup>[9-11]</sup>。由于热时间常数的不同, 各种敷设环境下电缆的温升特性存在差异, 例如直埋于土壤中的电缆可能需要几天甚至数月才能达到热稳定状态, 因此电缆可以承受一定时间过负荷运行而不会引发线芯过热<sup>[12]</sup>。综合考虑各种类型工况下电缆线路运行特性, 对电缆传输负荷进行合理设计并充分利用, 能够实现直流电缆线路的短时动态增容, 在满足更大传输容量的同时有效降低投资成本<sup>[13]</sup>。

已有针对直流电缆传输容量评估技术的研究主要围绕不同结构及敷设环境下直流电缆长期允许电流即稳态载流量的分析理论及方法<sup>[14]</sup>。Z. Y. Huang 提出了考虑绝缘层中电场强度的 HVDC 油纸电缆的稳态载流量计算方法<sup>[15]</sup>。在此基础上, 郝艳捧提出了综合考虑线芯最高允许温度和绝缘最大允许场强的 HVDC 交联电缆稳态载流量解析计算方法, 并利用有限元仿真结果进行了有效性验证<sup>[8]</sup>。

解析法具有简单实用的优点, 受到工程界的青睐, 但将周围环境视为单一均匀传热介质的处理方式过于简化, 适用范围有限。此外, 边界元法、有限差分法和有限元法等数值方法也被先后应用于电缆温度场和载流量的分析计算, 其中有限元法凭借其在复杂环境模拟和多物理场耦合处理方面的优势

更是成为了近年来主要采用的手段<sup>[16-18]</sup>。B. X. Du 研究表明, 提高绝缘材料的导热系数有助于提高电缆的传输容量<sup>[18]</sup>。夏源对 500 kV HVDC 海底电缆在 J 型管敷设环境下的稳态载流量进行计算, 分析了各种因素的影响<sup>[16]</sup>。

目前针对高压直流电缆的动态增容技术的研究尚不充分。刘贺晨开展了穿管敷设方式下 160 kV 直流电缆的动态载流量试验, 获得不同部位温度随时间的变化规律, 并利用数值仿真结果对试验数据进行了验证<sup>[19]</sup>。然而, 与交流电缆不同, 限制直流电缆动态增容能力的除了线芯温度以外, 绝缘电场(常用温差表征)也是关键要素之一。在直流电缆线路动态增容过程中, 绝缘材料电导率的温度和场强依赖特性将导致绝缘中的电场分布发生显著变化, 可能引发电场反转, 带来局部高场强。因此, 对于各种实际敷设环境中的高压直流电缆暂态电-热场特性以及动态增容能力进行研究, 仍是需要系统开展的一项重要工作。

本文采用有限元分析(finite element analysis, FEA)方法对架空、直埋和隧道三类典型敷设环境下的高压直流电缆建立暂态电、热场仿真模型, 研究典型波动负荷条件下的直流电缆温度场及绝缘电场响应特性, 对比各种敷设条件下电缆线路的增容能力; 在此基础上, 利用 FEA 模型反演计算不同设定条件下高压直流电缆的允许最大过负荷电流, 阐述及展示线路短时动态增容能力评估的技术方法, 并对直流电缆线路在过负荷作用下的暂态电热特性进行研究, 分析相关绝缘特性及运行条件对电热场的基本影响规律, 总结提出应急状态运行时需重点关注的电缆对象及运行要求, 为工程中高压直流电缆线路动态增容与优化调度提供理论指导。

## 1 模型建立及条件设置

### 1.1 仿真模型的建立

本文以南澳岛多端直流输电示范工程用直流 XLPE 电缆(型号为: DC-YJLW03-F-160 kV 1×500)为对象开展相关研究, 电缆额定电压为 160 kV, 导体截面积为 500 mm<sup>2</sup>, 基本结构及其余各层厚度如图 1 所示。

在 COMSOL 有限元仿真软件中, 对空气、土壤和隧道中敷设的电缆建立暂态热、电场模型, 如图 2 所示。

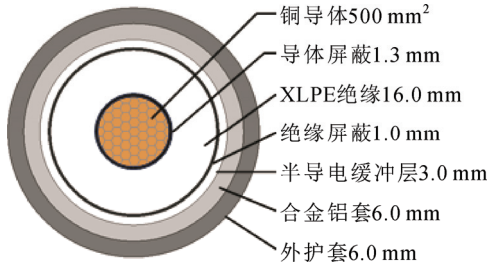


图1 160 kV 直流电缆的基本结构及尺寸

Fig.1 Main structure and dimensions of 160 kV DC cable

1.2 场控制方程

直流电缆在运行时，线芯中负载电流产生焦耳损耗，热流通过传导、对流及辐射方式向电缆本体及周围环境传递。与此同时，直流电缆承受工作电压，绝缘中产生电场，且电场分布受到温度分布的影响。因此，在对直流电缆开展暂态热、电场仿真时，涉及的控制方程包括电场控制方程、热场控制方程、以及电-热耦合场控制方程<sup>[20]</sup>。

1.2.1 热场控制方程

$$\begin{cases} d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted} \\ \mathbf{q} = -d_z k \nabla T \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\nabla$ 为矢量微分算子； $d_z$ 为厚度，m； $\rho$ 为材料密度， $\text{kg/m}^3$ ； $C_p$ 为恒压热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $\mathbf{u}$ 为对流项中的速度矢量，m/s； $T$ 为材料温度，K； $\mathbf{q}$ 为传热导通量， $\text{W/m}^2$ ； $k$ 为材料的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $Q$ 为热源，即热流密度， $\text{W/m}^3$ ； $q_0$ 为材料的初始热量，J； $Q_{ted}$ 为热弹性阻尼热源， $\text{W/m}^3$ 。

1.2.2 电场控制方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,\varphi} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量， $\text{A/m}^2$ ； $Q_{j,\varphi}$ 为电流源密度， $\text{A/m}^3$ ； $\sigma$ 为材料电导率， $\text{S/m}$ ； $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量， $\text{V/m}$ ； $\mathbf{J}_e$ 为外部注入电流密度矢量， $\text{A/m}^2$ ； $\varphi$ 为电势，V； $\mathbf{D}$ 为位移矢量， $\text{C/m}^2$ ； $t$ 为时间，s。

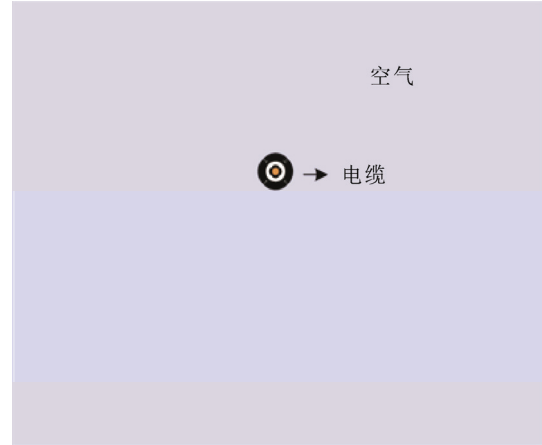
1.2.3 电-热耦合场控制方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (3)$$

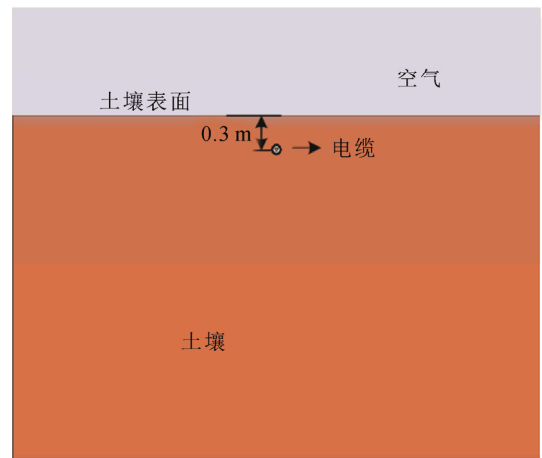
式中： $Q_e$ 为电磁热源， $\text{W/m}^3$ 。

1.3 材料属性及初始边界条件

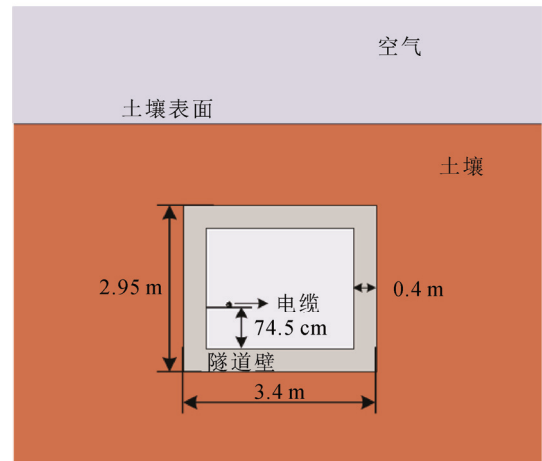
直流电缆的电场分布是由绝缘材料的电导率决定的，直流电压作用下，绝缘层中的电场强度按绝缘电导率反比分配。直流电缆绝缘的电导率具有



(a) 空气敷设



(b) 土壤直埋



(c) 隧道敷设

图2 电缆敷设条件示意图

Fig.2 Schematic diagram of cable laying conditions

随温度及场强变化的特性<sup>[21-22]</sup>。研究表明，对于高压电缆用聚合物直流绝缘，式(4)可以较好地描述在较大温度和电场范围内材料电导率随温度和场强的变化关系<sup>[23-24]</sup>。

$$\sigma(E, T) = \sigma_0 \exp(-a/T + bE) \quad (4)$$

式中:  $\sigma_0$  为设定场强及温度下的初始电导率, S/m;  $a$  为温度系数,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $b$  为电场系数, m/V,  $a$ 、 $b$  均与材料本身特性有关, 反映材料电导率的温度及场强依赖特性。文献[24-26]作者研究确定了上式中相关参数, 推荐采用式(5)描述直流电缆 XLPE 绝缘的电导率特性, 因此, 本文采用式(5)开展针对 160 kV 直流电缆的研究。电缆及环境相关各材料物性参数如表 1 所示。

$$\sigma(E, T) = 2.2896 \times 10^{-16} \exp(-7600/T + 1.42 \times 10^{-7} E) \quad (5)$$

仿真模型中, 电缆线芯上通过直流电流, 其上同时施加 160 kV 直流电压, 金属铝套接地。土壤上边界与空气发生对流换热, 对流传热系数设置为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 下边界距离电缆或隧道较远, 设置恒温边界, 温度  $20^{\circ}\text{C}$ ; 左右边界设置为热绝缘。考虑隧道内通风条件, 内部空气分别与电缆外表面和隧道内壁发生对流换热, 传热系数均设置为  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 电缆外表面对隧道内部空气产生热辐射, 设置电缆表面发射率为 0.95。

## 2 动态负荷条件下直流电缆电-热场仿真

为了研究不同敷设环境下 HVDC 电缆的动态增容能力, 需要明确动态负荷条件下电缆暂态热场与电场的响应特性。为此, 设置典型动态负荷, 开展直流电缆暂态电、热场仿真分析。

### 2.1 动态负荷条件设定

首先, 确定本研究中 160 kV 直流电缆在图 2 所示架空、直埋及隧道 3 种敷设方式及  $20^{\circ}\text{C}$  环境温度下的额定载流量  $I_R$ , 结果如表 2 所示。实际工程中, 电缆处于满载运行的时间不多, 大多数情况下线路负荷率在 50% 左右。因此, 结合实际电缆线路负荷波动特性, 假设电缆初始运行于负载电流为  $0.5I_R$  的稳定状态, 设计 3 组典型动态负荷电流曲线(见表 3), 分别研究不同负荷电流持续不同时间, 以及负荷电流周期性变化时电缆中的热场及电场特性。

### 2.2 动态负荷下直流电缆中的电-热场变化

以表 3 中 3 组典型动态负荷作为线芯中电流激励, 分别求解 3 种敷设环境下电缆的线芯温度以及绝缘层内外侧温度和场强随时间变化的响应曲线, 如图 3—图 5 所示。

#### 2.2.1 动态负荷 1

动态负荷 1 中, 电流由初始值  $0.5I_R$  增大到  $I_R$ , 并在持续 48 h(图 3 中由 24 h 至 72 h)后再降为  $0.5I_R$ 。在此负荷下, 电缆的温度场及电场响应如图 3 所示。

表 1 电缆及环境相关材料物性参数

结构名称	近似外径/mm	比热容/ ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	热导率/ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	相对介电常数
铜导体	26.5	385	400	8 940	$\infty$
导体屏蔽	29.1	2 274.8	0.2857	1 055	700
XLPE 绝缘	61.1	2 580.6	0.2857	930	2.3
绝缘屏蔽	63.1	2 274.8	0.2857	1 055	700
半导电缓冲层	69.1	2 000	0.23	1 150	2.5
合金铝套	81.1	897	238	2 700	$\infty$
HDPE 外护套	93.1	2 302.7	0.2857	900	2.25
混凝土		880	1.8	2 300	$\infty$
土壤		2 000	1.0	2 000	2.8

表 2 160 kV 直流电缆的稳态额定载流量

敷设环境	稳态额定载流量 $I_R/\text{A}$
空气敷设	1 200
土壤直埋	1 170
隧道敷设	1 750

表 3 电缆上施加的典型动态负荷曲线

序号	负荷电流(持续时间)
1	$0.5I_R(24 \text{ h}) + I_R(48 \text{ h}) + 0.5I_R(24 \text{ h})$
2	$0.5I_R(24 \text{ h}) + I_R(24 \text{ h}) + 0.5I_R(24 \text{ h}) + I_R(24 \text{ h}) + 0.5I_R(24 \text{ h}) + I_R(24 \text{ h}) + 0.5I_R(24 \text{ h})$
3	$0.5I_R(24 \text{ h}) + 1.2I_R(24 \text{ h}) + 0.5I_R(24 \text{ h})$

由图 3 中电缆暂态热场响应曲线可见, 在 3 种典型敷设环境中, 相比于负荷电流变化, 电缆的温度变化均存在明显的滞后效应, 表明电缆热惯性较大, 这是由于电缆与周围媒质均存在一定的热容所致。具体来说, 负荷由  $0.5I_R$  变为  $I_R$  后, 空气中敷设的电缆其线芯温度在 10 h 之内就由初始值上升到允许最大值  $70^{\circ}\text{C}$ ; 而在土壤中直埋和隧道中敷设的电缆, 在负荷  $I_R$  持续作用 48 h 后, 线芯仍未达到  $70^{\circ}\text{C}$ , 其中, 隧道敷设电缆的线芯温度仅达到  $49.28^{\circ}\text{C}$ , 离  $70^{\circ}\text{C}$  的允许最高温度仍有较大裕度。分析显示, 隧道敷设电缆的外部环境复杂, 包括空气层、隧道壁、土壤等, 等效热阻及热容均较大, 导致热时间常数大, 因此在施加动态负荷电流时, 线芯温度变化缓慢。

观察图 3 中的电场变化曲线可见, 随着负荷电流由  $0.5I_R$  增大到  $I_R$ , 电缆各层温度升高, 绝缘层内侧电场强度逐渐减小而外侧场强增大, 即电场呈现

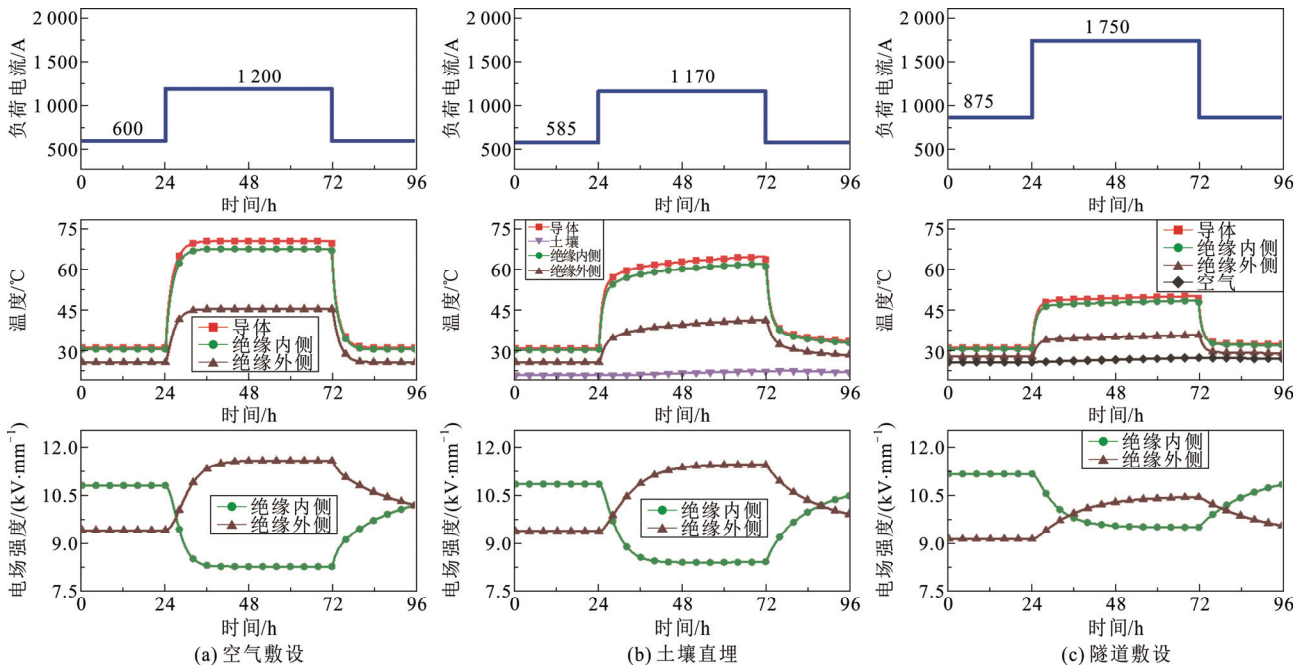


图3 不同敷设环境下电缆的暂态热场及电场变化(动态负荷 1)

Fig.3 Thermal and electric field variation of the cable in different laying environments (with dynamic load 1)

由内高外低转变为内低外高的所谓“电场反转”趋势。负荷电流  $I_R$  的作用导致绝缘整体温度升高, 内外侧温度梯度增大, 由于电导率受温度影响, 因此沿径向绝缘电导率不均匀程度增加, 导致绝缘内侧场强逐渐减小, 外侧场强逐渐增大。当负荷电流由  $I_R$  再减小到  $0.5I_R$  时, 绝缘中电场再次缓慢恢复成内高外低的分布。同时可以观察到, 由于热量从线芯沿径向向外传递, 绝缘层内侧温升响应较外侧更快, 因此其场强变化也更为迅速, 即绝缘层内侧的等效介电响应时间常数小于外侧。此外, 在相同的动态负荷作用下, 相比于架空和直埋, 隧道敷设电缆的绝缘层温度上升幅度最小, 电场变化范围也最小。

### 2.2.2 动态负荷 2

动态负荷 2 设计为周期性负荷电流, 以 48 h( $0.5I_R$ -24 h,  $I_R$ -24 h)为一个周期, 共施加 3 个周期。电缆的温度场及电场响应如图 4 所示。

由图 4(a)可见, 空气敷设条件下, 在每个周期中电缆的热场与电场都能变化至稳态, 因此, 随着负荷电流的周期性变化, 热场与电场也呈现周期性变化。而在土壤直埋和隧道敷设环境中, 如图 4(b)和 4(c), 由于电缆线路的等效热时间常数较大, 第 1 个周期结束时, 线芯温度分别为  $62.74\text{ }^\circ\text{C}$  和  $49.20\text{ }^\circ\text{C}$ , 未达到稳定状态; 而在随后的 2 个负荷周期中, 电缆绝缘的温度场除了随着负荷电流变化外, 还呈现出缓慢增长的趋势。在第 3 个周期结束时,

电缆线芯温度分别达到  $64.33\text{ }^\circ\text{C}$  和  $50.38\text{ }^\circ\text{C}$ , 比第 1 个周期结束时分别升高了  $1.59\text{ }^\circ\text{C}$  和  $1.18\text{ }^\circ\text{C}$ 。这是由于在土壤直埋和隧道敷设环境中, 每个负荷周期结束时电缆及其环境中的热量都未能完全释放, 这从图 4(b)中土壤表面及图 4(c)中隧道内空气温度持续缓慢升高也可以看出来, 因此, 随着负荷周期数的增加, 电缆的温度仍持续升高。

从图 4 可见, 在动态负荷 2 下, 相比于架空和直埋, 隧道敷设电缆的温度变化幅度最小, 对应的电场变化幅度也最小, 与动态负荷 1 下规律相同。

### 2.2.3 动态负荷 3

动态负荷 3 用以表征电缆经受短期过负荷的情况, 负荷电流由初始值  $0.5I_R$  增大到  $1.2I_R$  并在持续 24 h 后返回  $0.5I_R$ 。在此负荷下, 电缆的温度场及电场响应如图 5 所示。

由图 5(a)可见, 空气中敷设的电缆其热场及电场在  $1.2I_R$  电流作用 10 h 时已达到稳定, 此时线芯温度为  $98.63\text{ }^\circ\text{C}$ , 大大超过允许最高温度  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ; 绝缘中最大电场为  $12.83\text{ kV/mm}$ , 显著高于  $0.5I_R$  电流作用下的最大电场  $10.80\text{ kV/mm}$ 。而在土壤敷设条件下, 如图 5(b)所示, 电缆热场在负荷电流  $1.2I_R$  持续作用 24 h 后仍未达到稳态, 但线芯温度已超过  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , 达到  $85.16\text{ }^\circ\text{C}$ 。同样地, 绝缘中电场分布发生反转现象, 且最大电场由之前的  $10.85\text{ kV/mm}$  增大到  $12.69\text{ kV/mm}$ 。隧道中敷设的电缆, 如图 5(c)

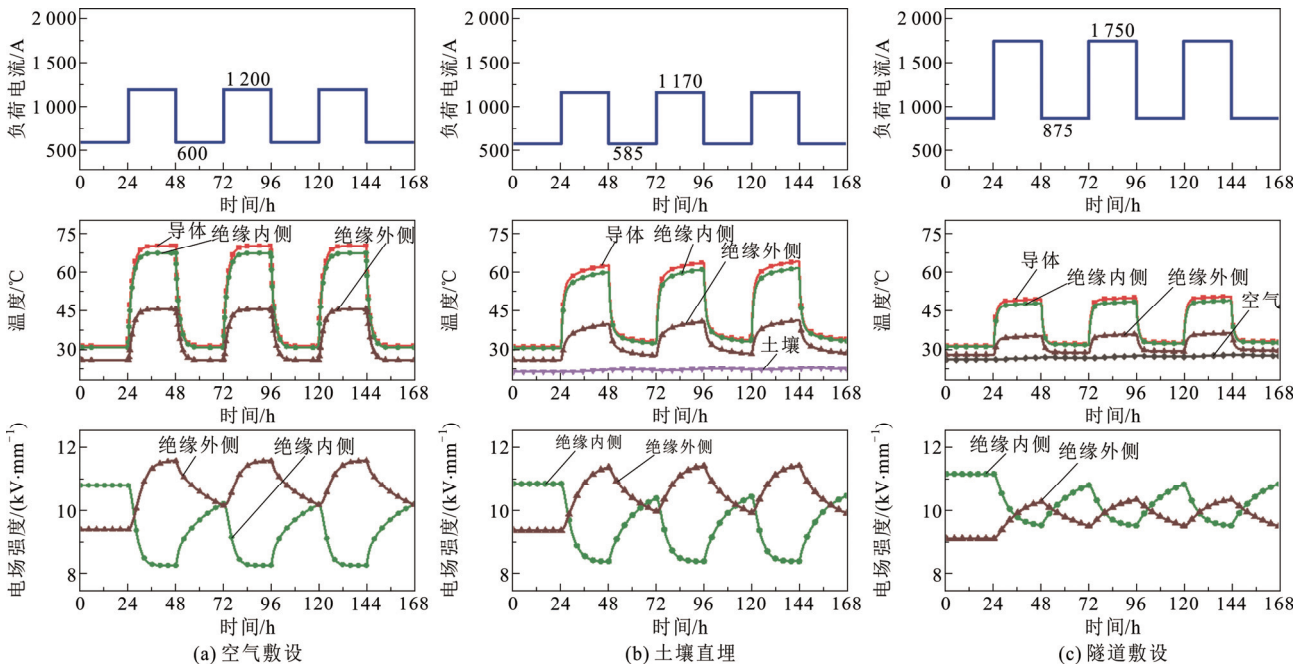


图 4 不同敷设环境下电缆的暂态热场及电场变化(动态负荷 2)

Fig.4 Thermal and electric field variation of the cable in different laying environments (with dynamic load 2)

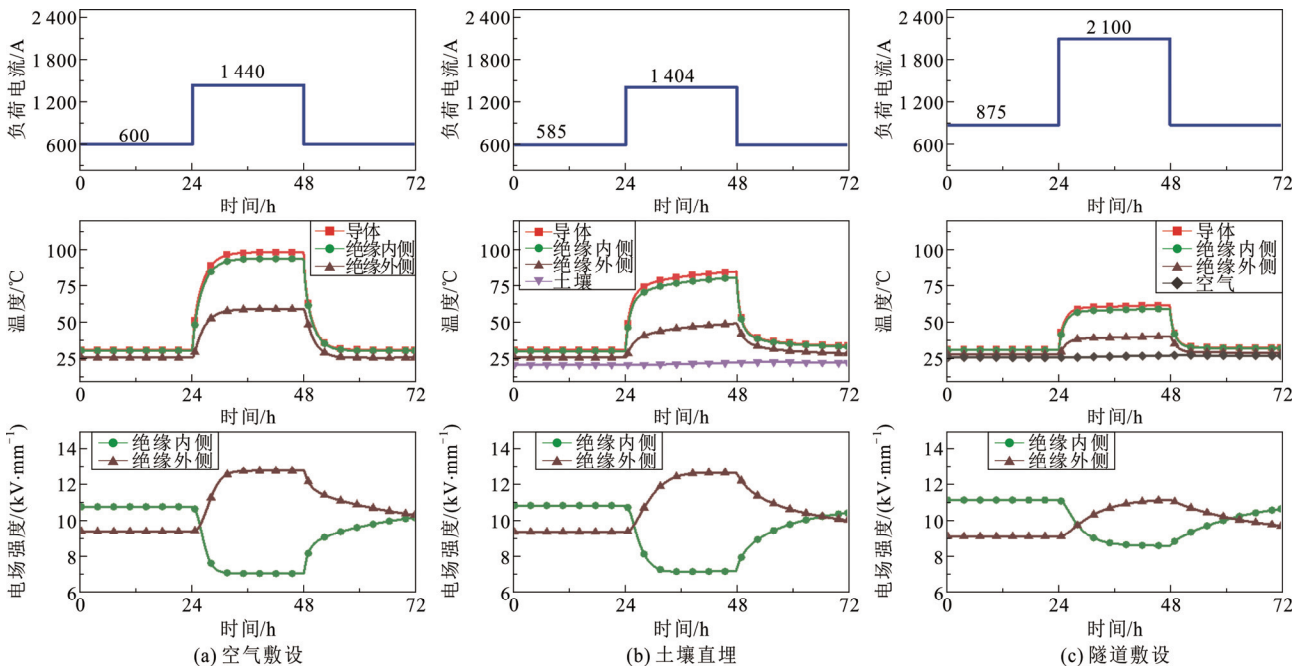


图 5 不同敷设环境下电缆的暂态热场及电场变化(动态负荷 3)

Fig.5 Thermal and electric field variation of the cable in different laying environments (with dynamic load 3)

所示, 其温度场在负荷电流  $1.2I_R$  持续作用 24 h 后仍未达到稳态, 且线芯温度仅为  $61.88\text{ }^\circ\text{C}$ , 离  $70\text{ }^\circ\text{C}$  的线芯最高允许温度仍有近  $10\text{ }^\circ\text{C}$  的裕度。同时, 在动态负荷下电缆绝缘中的最大电场值较小, 未超过  $0.5I_R$  电流下的初始值。

总结 3 种动态负荷下电缆线路的热场及电场响应, 隧道中敷设的电缆相比架空和直埋敷设具有更大的热响应时间常数, 达到约 426.6 h, 因此在同一

水平负荷电流作用下其温度变化幅度更小, 对应的电场变化幅度也更小。可以推测, 在相同的运行条件、线芯温度以及绝缘场强限值下, 隧道敷设的直流电缆能够提供更好的短时负荷增容能力。

### 3 直流电缆线路的动态增容技术

由于电缆及其周围环境的热惯性, 电缆的温度响应相对于线芯电流变化呈现出显著的迟滞效应。

因此在短时间内, 电缆中通过高于稳态负荷的暂态电流时, 线芯温度不会超过允许值, 可基于此效应实现电缆线路的短时动态增容。

相比于空气敷设和土壤直埋, 隧道敷设方式下的直流电缆线路在动态增容能力上具有优势。因此在本节中, 以隧道中敷设的 160 kV 直流电缆线路为例, 开展相关研究。

动态增容能力评估的实质是在满足电缆线芯最高温度及绝缘最大场强不超过允许值的要求下, 确定电缆中允许通过的最大持续过负荷电流。在动态负荷作用下, 电缆的暂态温升与场强变化一方面由负荷变动前的初始状态决定, 另一方面过负荷应急时长也是关键的影响因素。

本节利用 FEA 软件, 反演计算了不同应急时长及初始负荷条件下, 隧道敷设直流电缆的允许最大过负荷电流; 并在相应过负荷条件下, 分析了直流电缆的暂态热场及电场特性。

### 3.1 电缆允许最大过负荷电流的确定

直流电缆线路的动态增容研究中, 给定应急时长下的最大允许过负荷电流是运维人员关注的重点。在初始负荷电流和应急时长已知的情况下, 将线芯最高允许温度(70 °C)和绝缘最大允许场强(20 kV/mm)两个限制条件输入 FEA 模型中作为全局约束条件, 反演求解, 得到电缆的允许最大过负荷电流。为了提高计算效率, 选用牛顿法迭代进行

求解, 设置温度容差为 0.001 °C。

根据上述流程求解不同时长及初始负荷下电缆的允许最大过负荷电流, 结果显示, 当电缆初始负荷为  $0.5I_R$ , 应急时长分别为 0.5 h、1 h 及 2 h 时, 其允许最大过负荷电流为 3 420 A( $1.95I_R$ ), 2 880 A( $1.65I_R$ ), 2 540 A( $1.45I_R$ ); 而当电缆初始负荷分别为  $0.25I_R$ 、 $0.5I_R$ 、 $0.75I_R$ , 而应急时长固定为 2 h 时, 其允许最大过负荷电流为 2 690 A( $1.54I_R$ ), 2 540 A( $1.45I_R$ ), 2 255 A( $1.29I_R$ )。

### 3.2 不同应急时长下电缆允许过负荷电流及暂态热、电场响应

在上述不同应急时长的过负荷电流作用下, 模拟电缆的暂态温升与场强变化, 如图 6 所示。其中, 电缆线芯中电流初始值为  $0.5I_R$ , 在时间为 1 h 时, 应急过负荷电流作用到电缆上, 在达到规定应急时长后, 电缆线芯中电流恢复为  $0.5I_R$ 。

从图 6 中可以看出, 在相同的初始负荷条件下, 规定应急负荷时间越长, 电缆上允许的最大持续过负荷电流越小。

观察上述 3 种过负荷电流作用下电缆内的温度场变化, 可以发现, 尽管在过负荷电流作用下电缆线芯温度最终都达到 70 °C, 但由于负荷电流大小不同, 绝缘温差并不相同, 在 0.5 h、1 h 及 2 h 的应急时长所允许的过负荷电流作用下, 绝缘温差最大值分别达 30.86、27.82 及 25.62 °C。

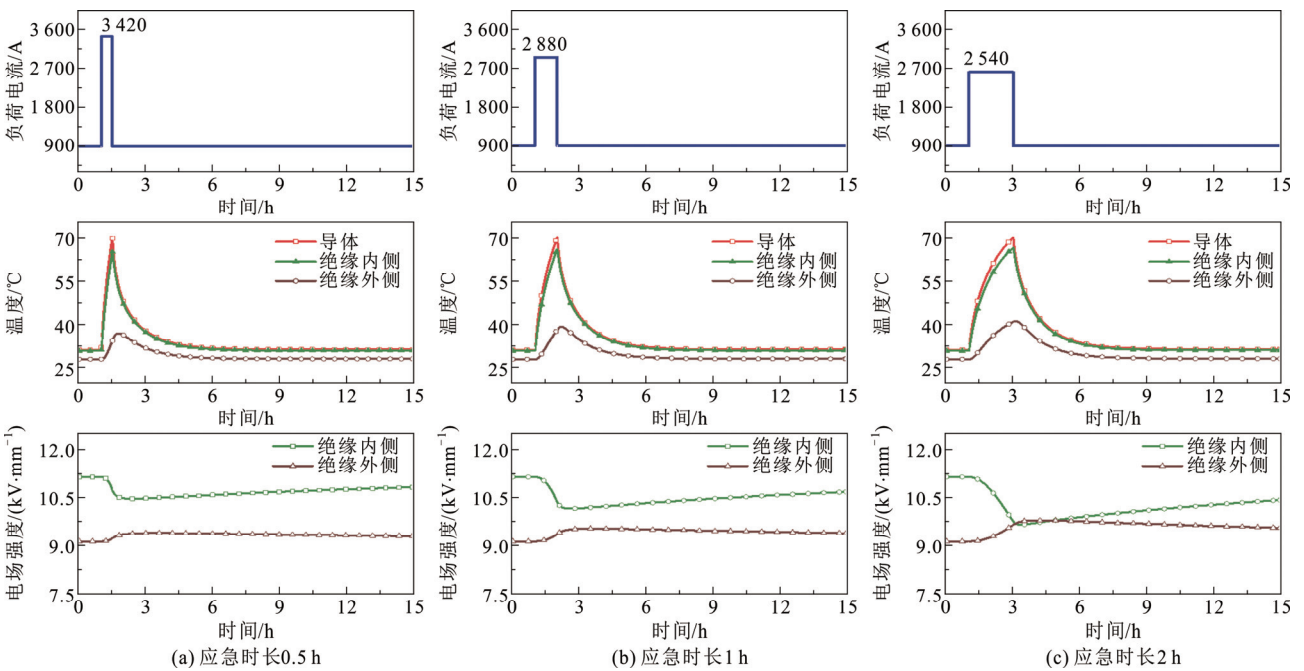


图 6 不同时长过负荷电流下电缆的热、电场响应

Fig.6 Thermal and electric field responses of the cable under the overload current with different durations

进一步观察图 6 中电缆绝缘内、外侧的场强变化, 可以发现, 在过负荷电流的作用下, 绝缘内侧场强逐渐减小, 外侧场强逐渐增大, 这种变化一直持续到过负荷电流作用结束, 之后, 绝缘内侧场强开始增加而外侧场强减小, 逐渐恢复至初始值。虽然 0.5 h 应急时长的过负荷电流最大, 为 3 420 A, 产生的绝缘温差也最高, 达到 30.86 °C, 但从结果来看, 应急时长为 2 h 的过负荷电流(2 540 A)作用导致的场强变化最为显著, 在过负荷电流作用结束时, 绝缘中的电场分布已经发生反转, 即绝缘外侧场强高于内侧。下面对此现象展开分析。

根据 1.3 节中采用的绝缘电导率模型, 进一步分析暂态过程中的电场变化规律。由式(4)可得, 暂态过程中直流绝缘的电导率表达式如下:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-a/T(t) + bE(t)) \quad (6)$$

式中, 电导率、温度及场强均随时间而变化, 分别用  $\sigma(t)$ 、 $T(t)$  和  $E(t)$  来表示。将等号两边同时对时间  $t$  求导, 可得电导率的变化速率  $\sigma'(t)$  与温升速率  $T'(t)$  和场强变化速率  $E'(t)$  的关系式为:

$$\sigma'(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{a}{T(t)} + bE(t)\right) \left(-\frac{a}{T^2(t)} T'(t) + bE'(t)\right) \quad (7)$$

基于式(5)中的温度系数  $a$  与电场系数  $b$ , 分析电导率变化速率  $\sigma'(t)$  受温度  $T(t)$  和温升速率  $T'(t)$  的影响。结果显示, 温度对电导率的变化速率影响较大, 温度越高, 电导率变化速率越小; 而电导率变化速率与温升速率具有正相关关系, 但相关系数小, 约为  $1 \times 10^{-17} \sim 1 \times 10^{-16} \text{ S}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 因此, 温升速率小范围变化对电导率变化速率的影响很小。

如图 6 所示, 上述 3 种过负荷电流作用下, 绝缘层温度整体上升, 应急时长越短时电缆上允许负荷电流最大, 温升速率越高。温度和温升速率两个因素对电导率的变化速率作用效果相反, 3 种电缆过负荷作用下绝缘温度变化区间没有太大差异, 而温升速率的影响小, 最终导致在过负荷电流作用期间, 绝缘电导率的平均变化速率基本相同, 因此, 绝缘场强的平均变化速率也基本一致。最终, 在相同变化速率下, 过负荷作用时间越长, 场强变化越显著。如图 6(c)所示, 应急时长为 2 h 的过负荷电流作用期结束时绝缘中电场分布已经发生反转, 即绝缘外侧场强高于内侧。可以推测, 当过负荷应急时长继续增加时, 电场反转的程度将更大, 这是在直流电缆动态增容中需要关注的问题。

### 3.3 不同初始负荷下电缆允许过负荷电流及暂态热、电场响应

在 3.1 节中不同初始电流条件的允许过负荷电流作用下, 模拟电缆的暂态温升与场强变化, 如图 7 所示。其中, 电缆线芯中电流初始值分别为  $0.25I_R$ 、 $0.5I_R$ 、 $0.75I_R$ , 在时间为 1 h 时, 应急过负荷电流作用到电缆上, 在达到规定应急时长(2 h)后, 电缆线芯中电流恢复为初始值。

从图 7 中可以看出, 在相同规定过负荷应急时长下, 初始负荷电流越大, 电缆上允许的最大持续过负荷电流越小。但与 3.2 节中相同初始负荷、不同应急时长下允许过负荷电流相比, 在相同的 2 h 规定时长内, 电缆初始负荷不同导致的允许过负荷电流在幅值上的差异要小很多, 从 2 690 A 至 2 255 A, 而前一种情况下电流允许值为 3 420 A 至 2 540 A。

观察图 7 中电缆绝缘内部温度和场强的暂态变化, 可以发现, 在过负荷电流作用期间, 由于绝缘内部温度梯度的增大, 绝缘层仍然呈现内侧场强减小而外侧场强增大的现象, 这与前述规律相同。但由于电缆的负荷初值不同, 绝缘中温度场和电场的初始分布状态也不相同, 因此, 在过负荷电流作用期间, 电缆的热场和电场变化也呈现不同的特点。

3 种初始负荷条件下, 绝缘层温差分别为 0.72、2.97、7.07 °C, 在各自的允许最大过负荷电流作用结束时, 线芯温度达到 70 °C, 绝缘层温差分别为 28.25、25.62、20.71 °C。因此, 初始负荷电流越大, 在动态增容过程中绝缘整体温度越高, 绝缘层温差变化幅度越小。

当负荷初值越高时, 电缆绝缘层在过负荷电流作用期间所处的温度区间越高, 且由于允许过负荷电流小, 绝缘温升速率低; 上述两项的贡献相叠加, 根据式(7)可推得, 在此期间电导率的平均变化速率较小, 对应的场强变化速率也较小。如图 7 中所示, 当负荷初始值为  $0.75I_R$  时, 场强在过负荷电流作用期间的变化幅度是最小的。但由于此电缆在初始状态下的绝缘内外侧场强差异较小, 在过负荷电流作用 1.5 h 后绝缘外侧场强就超过了内侧, 因此呈现了明显的“电场反转”现象。而负荷初始值为  $0.25I_R$  的电缆, 虽然在过负荷电流作用下绝缘场强的变化速率最大, 最终变化幅度也最大, 但因为初始时刻内侧场强显著高于外侧, 暂态结束时电场分布仍未发生反转。

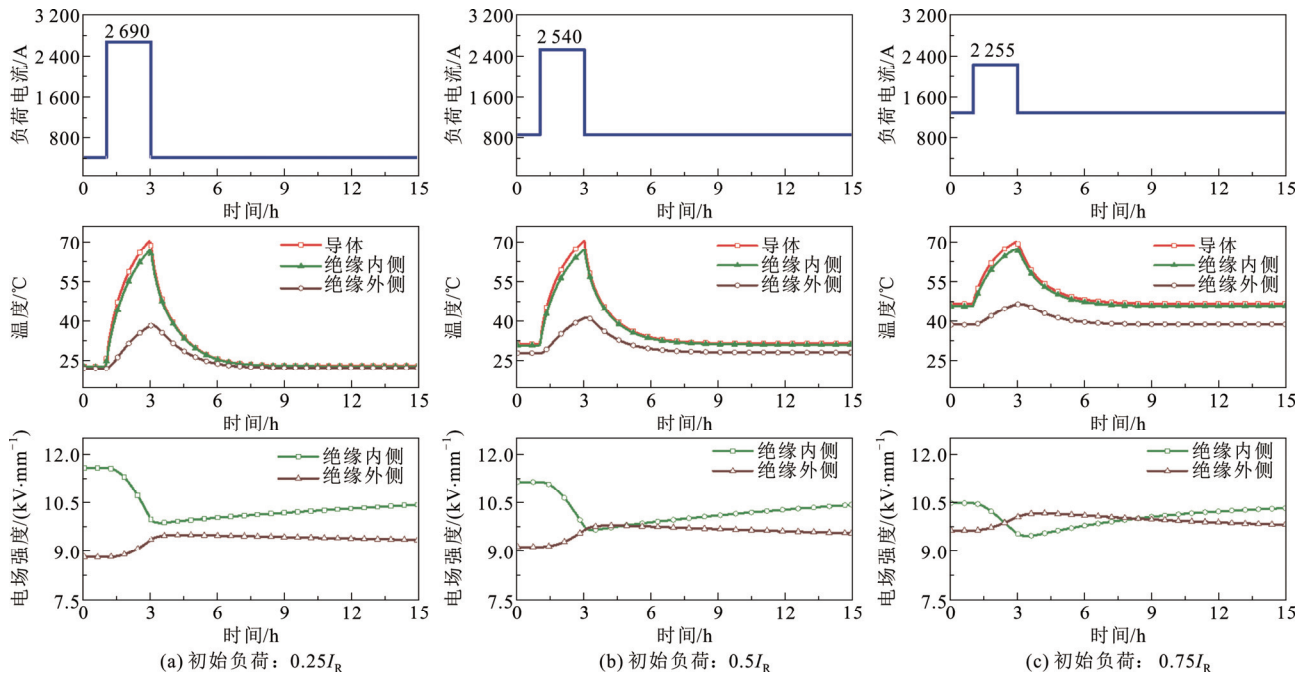


图7 不同初始负荷电缆在过负荷电流下的热、电场响应

Fig.7 Thermal and electric field responses of the cable with different initial loads under the overload current

由此部分研究可以看出,在对初始负荷率较高的直流电缆线路在应急状态下进行过负荷运行时,要关注其电场的变化,特别是对于绝缘电导率温度依赖性强的电缆,以及应急状态下允许电缆短时超温运行(例如线芯允许温度取 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的情况更应加强注意,提前做好温度及场强参数的校核工作,以确保应急过负荷运行电缆的可靠性。

#### 4 结论

1) 一定时间内直流电缆中通过高于稳态允许载流量的过负荷电流时,由于存在热响应滞后效应,线芯温度并不会超过允许值,可以利用这个效应来实现电缆线路的短时动态增容。

2) 对比空气敷设、土壤直埋和隧道敷设3种条件,由于隧道中敷设电缆线路的热响应时间常数远大于前两者,因此隧道中敷设的直流电缆系统具有最好的动态增容能力。

3) 在确定的线芯最高允许温度和绝缘最大允许场强下,当初始负荷电流越大,过负荷应急时长越长时,电缆线路在动态增容过程中允许的最大持续过负荷电流越小。在应急过负荷作用下,初始负荷率高,应急持续时间长,绝缘电导率温度敏感性强的XLPE直流电缆应加以特别关注,因其绝缘场强的变化幅度大,且可能发生显著的电场反转,给

电缆运行可靠性带来潜在威胁。

4) 考虑到实际高压直流电缆线路正常运行时负荷率通常不超过50%,本文研究数据显示,对于隧道中敷设的双极直流电缆线路,当某一极发生检修或故障停运时,另一级可在1.5倍额定电流负荷下安全运行2h。

#### 参考文献 References

- [1] MAZZANTI G. High voltage direct current transmission cables to help decarbonisation in Europe: recent achievements and issues[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 633-644.
- [2] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [3] 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.
- [4] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等. 中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从160 kV到200 kV再到320 kV[J]. 南方电网技术, 2015, 9(10): 5-12.  
XIE Shuhong, FU Mingli, YIN Yi, et al. Triple jumps of XLPE insulated HVDC cable development in China: from 160 kV to 200 kV and then to 320 kV[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(10): 5-12.
- [5] 张雯雯,魏震波,郭毅,等. 含混合储能体的交直流配电网日经济优化运行[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 565-574.  
ZHANG Wenwen, WEI Zhenbo, GUO Yi, et al. Optimal daily eco-

- onomic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 565-574.
- [6] DIBAN B, MAZZANTI G, SERI P. Life-based geometric design of HVDC cables-Part 2: effect of electrical and thermal transients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 97-105.
- [7] 钟启迪, 蒲 莹, 孙建锋, 等. 适用于柔性直流电网的 500 kV 级直流电缆与架空线路并联运行控制及保护策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 80-86.  
ZHONG Qidi, PU Ying, SUN Jianfeng, et al. Operation control and protection strategy of domestic 500 kV DC cable in flexible DC grid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 80-86.
- [8] 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.
- [9] MCDONALD H, ROWLAND S. HVDC cables and the influence of transient temperature changes[C]//2022 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Knoxville, USA: IEEE, 2022: 9-12.
- [10] 李生虎, 李璐璐, 陶帝文, 等. 含双馈机组风电场备用电缆位置和容量优化方法[J]. 电网技术, 2024, 48(03): 1125-1135.  
LI Shenghu, LI Lulu, TAO Diwen, et al. Optimization method to the location and capacity of backup cables in wind farm with doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1125-1132.
- [11] 程晓晓, 马建伟, 尹轶珂, 等. 高压 XLPE 绝缘电力电缆短时过载电流极限研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 150-155.  
CHENG Xiaoxiao, MA Jianwei, YIN Yike, et al. Research on short-time overload current limit for high voltage XLPE power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 150-155.
- [12] CIGRE. CIGRE TB 610-Offshore generation cable connections[R]. Paris, France: CIGRE, 2015.
- [13] 夏云山, 丁爱萍. 采用实时增容技术提高现有输电线路输送载流量的应用[J]. 广东科技, 2012, 21(13): 92, 91.  
XIA Yunshan, DING Aiping. Application of real-time capacity augmentation technology to increase the current carrying capacity of existing transmission lines[J]. Guangdong Science & Technology, 2012, 21(13): 92, 91.
- [14] 乔镜琪, 赵学童, 夏 源, 等. 不同敷设方式下±500 kV 高压直流海缆稳态载流量仿真分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 597-607.  
QIAO Jingqi, ZHAO Xuetong, XIA Yuan, et al. Simulation analysis of steady-state ampacity of ±500 kV high-voltage DC submarine cables under different laying methods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 597-607.
- [15] HUANG Z Y, PILGRIM J A, LEWIN P L, et al. Thermal-electric rating method for mass-impregnated paper-insulated HVDC cable circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 437-444.
- [16] 夏 源, 赵学童, 冯 勇, 等. ±500 kV 直流海缆在 J 型管敷设环境下的稳态载流量仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4851-4860.  
XIA Yuan, ZHAO Xuetong, FENG Yong, et al. Simulation study on steady-state ampacity of ±500 kV DC submarine cable under J-tube laying environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4851-4860.
- [17] 郝艳捧, 陈 云, 阳 林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.  
HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [18] DU B X, KONG X X, CUI B, et al. Improved ampacity of buried HVDC cable with high thermal conductivity LDPE/BN insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2667-2676.
- [19] 刘贺晨, 张铭嘉, 刘云鹏, 等. ±160 kV 交联聚乙烯直流海底电缆动态载流特性试验及仿真研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 19-27.  
LIU Hechen, ZHANG Mingjia, LIU Yunpeng, et al. Experimental and simulation study of dynamic ampacity characteristics for ±160 kV XLPE DC submarine cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 19-27.
- [20] 王 刚, 安 琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真: 多物理场数值分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
WANG Gang, AN Lin. Multiphysics Engineering practice and theoretical simulation: multi-physics numerical analysis technology[M]. Beijing, China: Electronic Industry Press, 2012.
- [21] YANG X, ZHANG Y, YANG Z D, et al. A simple method considering the synergetic effect of space charge and inhomogeneous material conductivity for DC electric field computation[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1141-1152.
- [22] 何金良, 党 斌, 周 垚, 等. 挤压型高压直流电缆研究进展及关键技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1417-1429.  
HE Jinliang, DANG Bin, ZHOU Yao, et al. Reviews on research progress and key technology in extruded cables for HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1417-1429.
- [23] GU J, LI X G, YIN Y. Calculation of electric field and temperature field distribution in MVDC polymeric power cable[C]//Proceedings of the 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China: IEEE, 2009: 105-108.
- [24] 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.
- [25] KUMARA S, SERDYUK Y V, JEROENSE M. Calculation of electric fields in HVDC cables: comparison of different models[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 1070-1078.
- [26] REDDY C C, RAMU T S. On the DC conductivity of HVDC cable insulation-cautions in using the empirical models[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada: IEEE, 2008: 39-42.



LIU Xiaomei  
Ph.D. candidate  
Corresponding author

刘潇镁(通信作者)  
2001—, 女, 博士生  
主要从事电缆及附件多物理场仿真与绝缘结构优化设计  
E-mail: Liuxiaomei\_xjtu@163.com



LIU Ying  
Ph.D., Professor

刘 英  
1976—, 女, 博士, 教授, 博导, IEEE PES WIP 会员  
研究方向为绝缘结构设计和电力电缆工程计算等  
E-mail: candyly@mail.xjtu.edu.cn