

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.036

复杂工况下高压电缆敷设简化模型研究及工程验证

何光华, 张志坚, 张培伦

(江苏省电力公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214061)

摘要: 针对几字型、高落差电缆模型的特点,发现拉管段、带中间限位的弧形垂直沉井段牵引力计算尚没有工程经验借鉴。根据实际敷设环境进行了敷设深度与弧形段高度差区段归类,分别建立了工程力学模型,采用理论计算和现场实测校核,确定工程计算公式,实现了复杂工况下高压电缆的安全、经济、高效敷设。最后以220 kV牵引东站工程为例,根据文中研究成果进行优化选型并形成施工方案,高落差电缆按连续敷设工艺顺利完成了敷设和打弯工作,各项指标良好,符合技术规范要求。

关键词: 高压电缆; 敷设方法; 复杂工况; 牵引力计算

Research on Simplified Model of High-voltage Cable Laying Under Complicated Working Conditions and Engineering Verification

HE Guanghua, ZHANG Zhijian, ZHANG Peilun

(Jiangsu Wuxi Power Supply Company of SGCC, Jiangsu Wuxi 214061, China)

Abstract: In the light of the characteristics of the cable construction model under complicated working conditions, it is found that there is no engineering experience to calculate the traction force of the stay tube section and the arc high drop section. This paper establishes the corresponding engineering mechanics models according to the construction site environment, which determines the engineering calculation formulas by theoretical deduction and the on-site industrial test verification, thus realizing the safe, economical and efficient laying of high-voltage cables under complex working conditions. Finally, the 220 kV East Traction Station project is taken as an example to verify the proposed construction scheme. The results show that the laying and bending tasks can be successfully completed and all the indicators are in perfect conformity with the technical specifications.

Key words: high-voltage cable; laying method; complicated working condition; calculate of the traction force

0 引言

电缆线路被喻为城市电网的“血管”,近年来呈快速发展趋势^[1-2],而城市内环高架公路、高铁、轻轨等立体交通建设规模的快速增长,导致几字型、高落差高压电缆工程项目开始不断涌现^[3-5]。该类高压电缆线路主要为变电站进线或高铁、重要用户的供电线路,施工工况复杂,供电可靠性要求极高,一旦故障抢修耗时长、成本高,造成的社会恶劣影响及人民生命财产损失不可估量^[6-9]。以往,针对该类

型电缆工程施工,缺乏几字型、高落差高压电缆无接头敷设固定工法及配套工器具,缺乏有效的检测手段,作业效率低下,国内外均未找到有效的解决方案^[10-13],成套施工技术和配套施工装备在世界范围内均处于空白^[14-16]。

文中通过建立非开挖拉管、带中间限位的弧形垂直竖井敷设牵引力工程模型及计算方法,形成了成套施工方法指导体系,满足了设计规范及国网十八项反措规定“桥架不宜布置电缆接头”的技术要求,为高压电缆施工提供技术参考^[17]。

1 几字型、高落差电缆敷设简化模型的建立

为便于研究,以220 kV大截面电缆牵引电站工程为例,建立模型。

1.1 大截面电缆牵引电站工程较高落差通道的特征描述

220 kV长江变~无锡东牵引站电缆线路工程共2回线路,一回电缆线路自长江变220 kV GIS至牵引站侧,一回电缆线路自长江变220 kV GIS至香楠变侧,电缆路径长度均为10 km;全线通道包含电缆夹层、电缆沟、涵洞、顶管隧道、排管、沉井、非开挖拉管、桥架、直埋等各种类型,户外终端头6只,GIS终端6只,中接头192只,工程共有9个较高的落差段,施工工况极为复杂。

1.2 几字型、高落差电缆的连续敷设典型模型

通过对前文描述的长江变~无锡东牵引站电缆线路工程特征进行分析,对通道复杂具有难度的、超过30 m的几字型、高落差情况进行特征归纳,参考部分区域根据调研的普遍情况给予一定取值范围,得出典型的综合通道模型,作为下一步的研究对象。通过对该模型的分析,确定连续敷设工艺方法原则和相关简化计算方式,从而便于指导该类工程的实践应用。具体模型见图1。

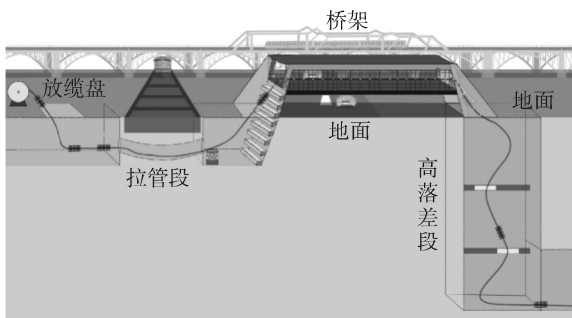


图1 复杂工况下典型高压电缆敷设模型

Fig. 1 Typical high-voltage cable laying models under complicated working conditions

通过归纳得出,该模型的主要特征为:

1) L_1 取值范围为20~200 m。该模型段落具有较长的非开挖拉管长度和狭小的相连工井。

2) L_2 取值范围在20~30 m。该模型段落具有超过30 m的落差,且需满足单段连续敷设的通道条件。

根据前述模型特征分析,可得到几字型、高落差高压电缆的连续敷设难点:

文中所提高落差电缆敷设模型,涉及到了拉管敷设和高落差段落的敷设,目前该类型段落的牵引力、侧压力的工程简化计算公式上没有相关经验,通过该模型研究,提供可应用于工程的牵引力、侧

压力简化计算公式和方法。同时应通过技术经济比较计算,确定输送机个数和位置,兼顾减小卷扬机牵引力和现场输送机布置的技术经济最优化。

考虑到该模型敷设较为复杂的段落主要为拉管段、高落差段落,下面对该两段落展开重点研究。

2 拉管敷设的牵引力简化计算公式研究

目前现有《电缆线路各部分牵引力计算公式》手册中对于任意拉管敷设路径轨迹的牵引力工程计算没有公式可以参考;现有的来自于工程实际的近似估算法需要有理论计算依据来确定裕度^[18-20]。文中首先展开高落差电缆复合通道中拉管敷设牵引力计算的模型简化研究,为今后相关的工程应用奠定理论基础。

典型的大截面电缆拉管敷设轨迹见图2,根据大截面电缆水平定向敷设轨迹,可将高压大截面电缆轴向的拉力分解为斜线部分(入射段)、弧线部分(过渡段)和直线部分(水平段)3段分别计算,求取所需要的最大牵引力,下面求解拉管敷设典型轨迹模型的计算公式。

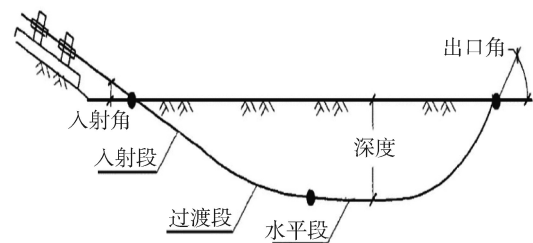


图2 拉管敷设轨迹示意图

Fig. 2 Laying trajectory of the high-voltage cables

将图2敷设轨迹进一步简化,结构模型见图3,其中高压电缆由左侧进入右侧拉出。

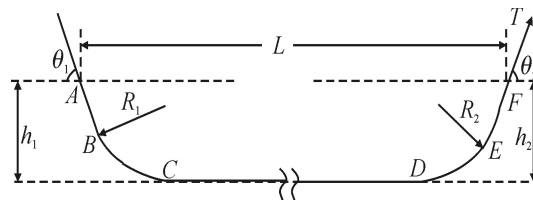


图3 拉管敷设轨迹模型

Fig. 3 Idealized model of the incident section

图3中: L 为电缆敷设水平距离; θ_1 为电缆敷设入射角; θ_2 为电缆敷设出射角; h_1 为电缆敷设入射端深度; h_2 为电缆敷设出射端深度; R_1 为入射端弧线弯曲半径; R_2 为出射端弧线弯曲半径。此外,设 W 为电缆单位长度重量; μ 为摩擦系数。

根据力学受力分析,可分别求解得出各段电缆

所需轴向牵引力, 分别如下:

1)斜线下行 AB 段

$$F_{\text{斜线下行}} = 9.8W\{h_1 - R_1[1 - \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_1)]\} \cdot \csc \theta_1 (\mu \cos \theta_1 - \sin \theta_1) \quad (1)$$

2)斜线上行 DF 段

$$F_{\text{斜线上行}} = 9.8W\{h_2 - R_2[1 - \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_2)]\} \cdot \csc \theta_2 (\mu \cos \theta_2 + \sin \theta_2) \quad (2)$$

3)弧线下行 BC 段

$$F_{\text{弧线下行}} = 9.8\mu WR_1 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - 9.8WR_1 + 9.8W \sqrt{R_1^2 - [R_1 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_1)]^2} \quad (3)$$

4)弧线上行 DE 段

$$F_{\text{弧线上行}} = 9.8\mu WR_2 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_2) + 9.8WR_2 - 9.8W \sqrt{R_2^2 - [R_2 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_2)]^2} \quad (4)$$

5)水平段 CD

$$F_{\text{水平}} = 9.8\mu W[L - R_1 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - R_2 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_2) - \{h_1 - R_1[1 - \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_1)]\} / \tan \theta_1 - \{h_2 - R_2[1 - \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_2)]\} / \tan \theta_2] \quad (5)$$

根据上述式(1)-(5), 可得综合拉力

$$T = F_{\text{斜线下行}} + F_{\text{弧线下行}} + F_{\text{水平}} + F_{\text{弧线上行}} + F_{\text{斜线上行}} \quad (6)$$

综上所述, 对于拉管敷设复杂施工工况下的综合拉力计算都可以按照上述推导出的公式计算得出, 具体要参照实际敷设方案中给出的敷设轨迹模型计算, 得出大截面高压电缆在不同长度、不同形态的拉管中敷设时所需要的最大牵引力。

3 高落差连续敷设的牵引力简化计算公式研究

首先给出带中间限位的弧形垂直敷设简化模型图, 分别见图 4、5。

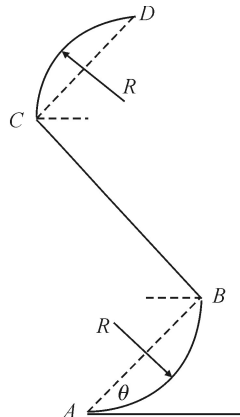


图4 弧线式牵引模型

Fig. 4 Idealized arc-shaped traction model

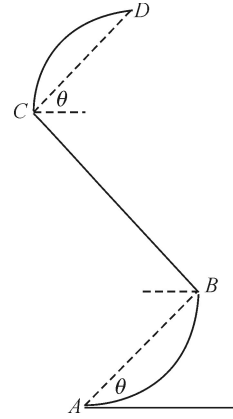


图5 3段折线式牵引模型

Fig. 5 Three stage broken line traction model

设 R 为电缆弯曲半径; L_{BC} 为电缆竖井敷设 BC 段长度。

1)弧线式敷设模型牵引力计算模型。根据力学分析, 不难得出各段所需牵引力。

DC 弧段

$$T_c = \frac{9.8WR}{1 + \mu^2} [2\mu \sin \theta - (1 - \mu^2)(e^{\mu\theta} - \cos \theta)] + T_D e^{\mu\theta} \quad (7)$$

CB 弧段

$$T_B = T_c + 9.8\sqrt{2}WL_{BC}(\mu \cos \frac{\pi}{4} - \sin \frac{\pi}{4}) \quad (8)$$

BA 弧段

$$T_A = T_B e^{\mu\theta} - \frac{9.8WR}{1 + \mu^2} [(1 - \mu^2) \sin \theta + 2\mu(e^{\mu\theta} - \cos \theta)] \quad (9)$$

2)折线式敷设模型牵引力计算模型。为减少工程计算工作量, 将弧形简化, 见图 5。根据力学分析, 同样可得出各段所需牵引力。

DC 段

$$T_c = \frac{9.8WR}{\sin \theta} (\mu \cos \theta - \sin \theta) + T_D \quad (10)$$

CB 段

$$T_B = T_c + 9.8\sqrt{2}WL_{BC}(\mu \cos \frac{\pi}{4} - \sin \frac{\pi}{4}) \quad (11)$$

BA 段

$$T_A = \frac{9.8WR}{\sin \theta} (\mu \cos \theta - \sin \theta) + T_B \quad (12)$$

工程经验表明, 上述 3 段折线式敷设模型比弧线式敷设模型更具实用价值, 计算方便、可靠。

进一步考虑电缆的最大允许牵引力

$$T_m = \sigma A \quad (13)$$

式(13)中: σ 为导体允许的牵引强度, N/mm^2 , 铜导体为 68.6, 铝导体为 39.2, 铅护套为 10, 铝护套为 20, 塑料护套为 7; A 为电缆导体截面, mm^2 。

由此, 可以推导出不同截面的电缆, 在各种轨迹类型的拉管下, 允许的最长拉管长度。此外, 为了确保电缆的拉力不超过限定值, 可以设定一个安

全系数。

一般情况下,3层的沉井高度约为15~30 m, R 的取值范围为5~10 m,通过工程实践设置理论公式与工程简化公式的系数比值,确定安全系数比值为1.56,即可得出实用的工程简化公式。

4 现场工程验证

4.1 减小牵引力、侧压力的方式

根据设计规范,220 kV 2 500 mm²大截面电缆的牵引力不得超过 $70 \times 2\ 500 = 175\ 000$ N/mm²,通过滑轮组敷设侧压力不得超过2 kN/m,滑板侧压力不得超过3 kN/m。

通过文中所求解的工程简化公式,可对高落差段落内的电缆敷设牵引力进行计算,并通过以下方式减小牵引力、侧压力使其满足设计规范要求:

1)减小牵引过程中的各种阻力,是限制和减小牵引力的一种有效方法。如在敷设电缆的沿线合理布置滑轮来减小摩擦阻力;在管壁和电缆之间、电缆轴和支架之间等易接触摩擦的地方涂润滑剂来减小摩擦力。

2)安装良好的联动控制装置,卷扬机牵引速度应和各电缆输送机速度保持一致。速度是否同步是保证电缆敷设质量的关键,两者的微小差别会通过输送机直接反映到电缆的外护层上,应确保全线牵引设备在整个敷设电缆过程中保持匀速。

3)敷设条件许可时,尽可能提高电缆敷设过程中输送机的出力比重,降低牵引机的出力比重,牵引机仅起到导向和辅助牵引的功能,可大幅降低电缆敷设受损的几率。

4)在上下坡度及拐弯较多的地方,要严格控制牵引力,过快的牵引或输送都会在电缆内侧或外侧产生过大的侧压力,而XLPE绝缘电缆外护层为PVC或PE材料制成,当滑轮组敷设时,侧压力大于2 kN/m²时,就会对外护层产生损伤。此时可适当放慢牵引速度,确保转弯半径满足要求,必要时增加滑轮组以减小每个滑轮上的侧压力。

4.2 工程案例介绍

以220 kV牵引东站工程香江线为例,首先介绍该项工程较高落差通道基本特征:

跨国道公路:最高点至最低点约32.65 m,其中顶部距离地面-2.5 m的高2 m的电缆沟涵通过40~60 m非开挖拉管与距离地面-2.5 m的高2 m、宽8 m的电缆井相连,该井与通过一段约45°、一段60°的斜坡沟涵与底部距离地面+7 m高、高3.5 m的电缆

桥架相连,经过116 m电缆桥架,通过沉井与顶部距离地面-22 m的电缆隧道相连。

跨铁路:最高点至最低点约30.65 m,由距离地面-2.5 m的电缆沟涵通过45°斜坡沟涵与距地面-12 m的直径为2.4 m的顶管隧道的竖井接通,通过竖井与45°斜坡沟涵连接至距地面5 m的桥架,通过116 m的桥架。

跨航运河流:最高点至最低点约10.75 m,顶部距离地面-2.5 m、高2 m的电缆沟涵通过45°斜坡沟涵进入底部距离地面5~7 m、长90 m、高3.5 m的跨河电缆桥架,然后通过45°斜坡沟涵与顶部距离地面-2.5 m、高2 m的电缆沟涵相连。

针对满足上述特征的几字型、高落差通道,宜优先采用连续敷设方式,避免将电缆接头布置在高处桥架上,从而提高今后的运维质量和效率。

根据文中计算模型进行优化选型结果如下:

1)高落差连续敷设的弯曲半径。弯曲半径不小于3 m,该项目基本控制在不小于3.5 m。

2)高落差连续敷设的方向选择。敷设方向为:涵沟—拉管—工作井—斜坡涵沟—桥架—斜坡涵沟—沉井—隧道(从左向右)。

3)高落差连续敷设的牵引方法选择。由于拉管超过66 m,在拉管段内,采取了牵引、输送同步的牵引方式控制。

4)合计使用了8台输送机,每个转弯处至少5个滚轮以满足侧压力的要求。

详细的敷设优化施工布置见图6。

展示了现场施工场景见图7。

根据上述技术方案,高落差电缆按连续敷设工艺顺利完成了敷设和打弯工作,电缆敷设和打弯外观检查和试验检查无损伤,各项指标良好,完全符合技术规范要求,为该领域的高压电缆施工提供了极具价值的参考方案。

5 结论

1)文中首次建立了安全、有效、便捷的非开挖拉管、带中间限位的弧形垂直竖井敷设牵引力工程计算公式,通过几字型高落差无接头方式下的敷设力学计算和试验校核,形成了成套施工指导方法,实现了复杂工况下高压电缆线路的安全经济敷设,满足了设计规范“桥架不宜布置电缆接头”的技术要求。

2)在无锡220 kV牵引东站工程电缆线路上成功将文中所提电缆线路敷设方案进行应用验证,结果表明文中所提方案下的各项指标良好,完全符合技

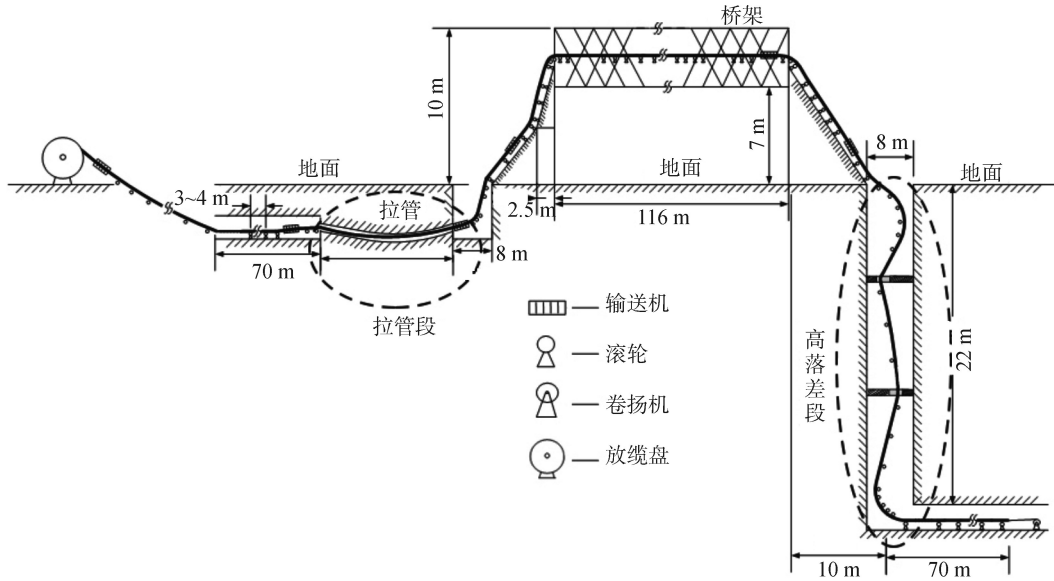


图6 敷设优化布置图

Fig. 6 Optimized layout scheme plan

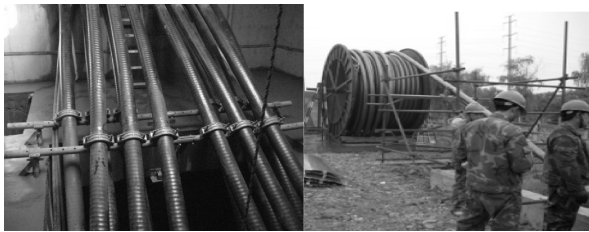


图7 现场施工图

Fig. 7 Scene construction location situation of the project

术规范要求,显著降低施工成本,为高压电缆敷设提供了极具参考价值的技术方案。

参考文献:

[1] SUN Bin, ELHAM M. Configuration optimization of cables in ductbank based on their ampacity[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2018.

[2] 严有祥,方晓临,张伟刚,等. 厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1147-1153.

YAN Youxiang, FANG Xiaolin, ZHANG Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen ±320 kV flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153.

[3] 王春江. 电力电缆手册第三册[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:202-210.

WANG Chunjiang. The third volume of power cable manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 202-210.

[4] 周韞捷,姜芸,蒋晓娟. 远距离跨海大桥高压电缆敷设工程[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 87-90.

ZHOU Yunjie, JIANG Yun, JIANG Xiaojuan. Cable laying project of long distance bridge cutting across sea[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 87-90.

[5] 曹克鹏. 电缆输送机敷设大截面电缆的施工[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(7):90.

CAO Kepeng. Construction of large section cable laying for cable conveyor[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(7):90.

[6] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2619-2626.

CHEN Qingguo, QIN Yanjun, SHANG Nanqiang, et al. Influence analysis of temperature on electric-field distribution in HVDC cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9):2619-2626.

[7] 高云鹏,谭甜源,刘开培,等. 电缆接头温度反演及故障诊断研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(2):535-542.

GAO Yunpeng, TAN Tianyuan, LIU Kaipei, et al. Research on temperature retrieval and fault diagnosis of cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):535-542.

[8] 陈铮铮,赵健康,张丽,等. 直流电缆上交流分量的计算及其屏蔽[J]. 中国电力, 2012, 45(7):4-8.

CHEN Zhengzheng, ZHAO Jiankang, ZHANG Li, et al. Calculation and shielding of AC component on DC cables[J]. Electric Power, 2012, 45(7):4-8.

[9] UCHIDA K, KOBAYASHI S. New after-laying test methods for XLPE cable lines[J]. Electrical Engineering in Japan, 1996, 117(6):818-825.

[10] GARRIDO C, OTERO A F. 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.

[11] 张东斐,唐庆华,朱利军. 110 kV 国桥线电缆接头故障分析及处理[J]. 天津电力技术, 2007, 33(4):34-38.

ZHANG Dongfei, TANG Qinghua, ZHU Lijun. Analysis and treatment of 110 kV national bridge cable joint fault[J].

- High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 34-38.
- [12] 丁辉, 韩民晓, 肖湘宁, 等. VSC-HVDC与平行架设交流线路基频电磁感应边界条件[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 183-189.
DING Hui, HAN Minxiao, XIAO Xiangning, et al. Fundamental frequency electromagnetic induction boundary condition analysis of VSC-HVDC system with paralleled AC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 183-189.
- [13] 周远翔, 刘睿, 张云霄, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 电工文摘, 2014, 40(6): 1-14.
ZHOU Yuanxiang, LIU Rui, ZHANG Yunxiao, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. Electrician Abstracts, 2014, 40(6): 1-14.
- [14] MARUYAMA S, ISHII N, SHIMADA M, et al. Development of a 500 kV DC XLPE cable system[J]. Furukawa Review, 2003(25): 47-52.
- [15] 刘渝根, 尚龙龙, 田金虎, 等. 220 kV四回高压电缆同相2根并联敷设方式优化研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 25-32.
LIU Yugen, SHANG Longlong, TIAN Jinhu, et al. Optimal layout of the 220 kV quadri-circuit cables with double-split conductors in each phase[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 25-32.
- [16] TOMITA M, AKASAKA T, FUKUMOTO Y, et al. Laying method for superconducting feeder cable along railway line[J]. Cryogenics, 2018(89): 125-130.
- [17] WU Chuan, GUO Jun, WU Xiaoming. Calculation method of the pull-back force for cable laying of the trench less completed power pipe-line[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 41(4): 681-686.
- [18] 郑雁翎. 电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3760-3765.
ZHENG Yanling. Research on numerical calculation model of cable group carrying capacity optimization for cable line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3760-3765.
- [19] CHOI Y. ROV-based automated cable-laying system: Application to DONET2 installation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(3): 665-676.
- [20] 曹晓斌, 易志兴, 陈奎, 等. 高速铁路单芯馈线电缆的敷设方式和敷设间距[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 85-90.
CAO Xiaobin, YI Zhixing, CHEN Kui, et al. Laying mode and laying spacing for single-core feeder cable of high speed railway[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 85-90.

何光华(1978—), 女, 本科, 技师, 长期从事电力电缆施工及检修工作。

(上接第230页)

- site MV cable using frequency-tuned resonant system[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, China: [s.n.], 2016: 904-907.
- [9] 王伟, 王永亮, 刘冲, 等. 110 kV三相交叉互联电缆的频变模型及局放仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 117-122.
WANG Wei, WANG Yongliang, LIU Chong, et al. Partial discharge simulation analysis and frequency-dependent model for 110 kV three-phase cross-bonded cable[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(1): 117-122.
- [10] 姚翔, 李海生, 付尚莹. XLPE电缆交叉互联系统中的局放脉冲传播特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 416-418.
YAO Xiang, LI Haisheng, FU Shangying. The propagation characteristics of partial discharge in cross-bonded XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 416-418.
- [11] 张磊祺, 盛博杰, 姜伟, 等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测和定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2706-2715.
ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, et al. On-line partial discharge localization in cross-bonded HV cable systems[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2706-2715.
- [12] 章鹿华, 王伟, 李华春. 交叉互联接地电缆系统局放检测的仿真研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 38-42.
ZHANG Luhua, WANG Wei, LI Huachun. The emulation research of partial discharge detection for the cross bonding cable system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(1): 38-42.
- [13] 郑文栋, 杨宁, 钱勇, 等. 多传感器联合检测技术在XLPE电缆附件局部放电定位中的试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 84-88.
ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al. Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 84-88.
- [14] KOLTUNOWICZ W, PLATH R. Synchronous multi-channel PD measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1715-1723.
- [15] KRAETGE A, HOEK S, HUMMEL R, et al. De-noising approaches for partial discharge measurements-A comparison of methods and their practical application[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. [S.l.]: IEEE, 2013: 538-541.

刘孟佳(1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事高电压与绝缘方面的研究。