

土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真研究

陈莉¹, 邵千秋², 王然然¹, 唐军¹

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:针对目前没有成熟的交流电缆中间接头载流量校核方法, 搭建了土壤直埋 110 kV 电缆中间接头和电缆本体稳态载流量三维仿真模型, 利用有限元对比研究环境温度、土壤导热系数和敷设深度对电缆中间接头和本体稳态载流量的影响规律。结果表明: 在不同环境温度、土壤导热系数和敷设深度下, 电缆中间接头载流量始终小于电缆本体载流量, 土壤导热系数为 $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、环境温度为 293 K 以及敷设深度为 1.75 m 时的中间接头载流量相较于相同条件下的本体载流量减小了 10.8%。因此, 如按照电缆本体载流量校核电缆载流能力, 将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态。为确保电缆长期稳定运行, 建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

关键词:直埋交流电缆; 中间接头; 载流量; 有限元仿真

中图分类号: TM 726.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)05-0007-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230502

Simulation Study on Steady-state Current Carrying Capacity of Intermediate Joints of Directly Buried 110 kV Cables

CHEN Li¹, SHAO Qianqiu², WANG Ranran¹, TANG Jun¹

(1. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: As there is no mature standard for checking the current carrying capacity of AC cable intermediate joints at present, a three-dimensional simulation model for the steady-state current carrying capacity of directly buried 110 kV cable intermediate joints and the cable body is established, and the influence law of ambient temperature, soil thermal conductivity and buried depth on steady-state current carrying capacity of intermediate joints is studied comparatively by finite elements. The results show that the carrying capacity of intermediate joint under different ambient temperatures, soil thermal conductivities and buried depths is always less than that of the cable body, and the carrying capacity of intermediate joint under the soil thermal conductivity of $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, the ambient temperature of 293 K and the buried depth of 1.75 m is 10.8% less than that of the cable body. According to the above research results, if the cable current carrying capacity is determined by that of the cable body, the major insulation of intermediate joints will be in an accelerated thermal aging state. In order to ensure the long-term stable operation of the cable, it is recommended that a certain margin should be left when the current carrying capacity is determined by the cable body.

Key words: directly buried AC cable; intermediate joint; current carrying capacity; finite element simulation

0 引言

载流量是高压电力电缆重要的技术指标之一, 是指在一定条件下电力电缆允许通过的持续电流值, 反映了电力电缆线路承载负荷的能力^[1]。高压

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521903230001)

电力电缆载流量不仅取决于电缆类型和规格, 还与其实际安装、敷设条件和运行环境有关, 通常以其本体线芯长期允许最高运行温度 363 K 作为载流量的计算校核标准^[2-3]。国内外学者依据文献[4-5]等标准, 采用解析算法形成了不同敷设条件和运行环境下的系列电力电缆载流量数据表, 为电网规划运行提供了数据支撑^[6-7]。

由于电力电缆中间接头结构较本体更为复杂,通常采用数值算法计算其实际载流量。现有研究已表明直埋电缆中间接头和本体的载流量存在差异,若按照电缆本体载流量校核会导致中间接头线芯最高运行温度明显高于 363 K,不利于电缆中间接头的长期稳定运行^[8-10]。然而现有研究采用轴对称数值计算模型,难以正确反映实际对流散热边界条件,并且现尚无成熟的交流电缆中间接头载流量校核方法。

因此,下面搭建了土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量三维仿真模型,利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件研究了环境温度、土壤导热系数和敷设深度对中间接头稳态载流量的影响规律,并与相同条件下的电缆本体稳态载流量相比较,以期为确定多种敷设环境下电力电缆中间接头的载流量提供方法参考。

1 直埋电缆中间接头和本体的温度场模型

1.1 电缆中间接头和本体的结构及参数

选用截面为 1200 mm²的 64/110 kV 电缆中间接头作为仿真对象,如图 1 所示。中间接头包含线芯、连接管、高压屏蔽层、三元乙丙橡胶应力锥、交联聚乙烯主绝缘、绝缘屏蔽层、硅橡胶增强绝缘、聚氨酯密封胶和铜壳。类似的,选用截面为 1200 mm²的 64/110 kV 电缆本体作为仿真对象,如图 2 所示。电缆本体由轴心向外依次包含线芯、高压屏蔽层、交联聚乙烯绝缘层、绝缘屏蔽层、铜丝编织玻璃纤维缓冲层、铝护套和外护层。中间接头和电缆本体各部分的热力学参数分别如表 1 和表 2 所示^[1,9,11-12]。

1.2 仿真几何模型及边界条件

搭建土壤直埋 110 kV 中间接头和电缆本体的稳态载流量三维仿真模型,分别在接头和本体周围添加土壤;在仿真中设置 A 面为对流热通量边界条件,土

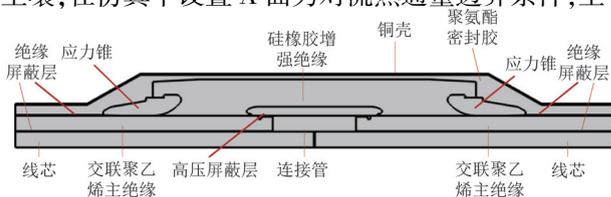


图 1 64/110 kV 电缆中间接头剖面图

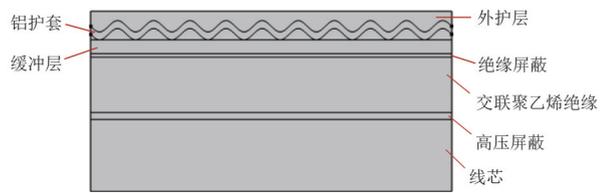


图 2 64/110 kV 电缆本体剖面图

表 1 64/110 kV 电缆中间接头材料热力学参数

中间接头结构	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)	恒压热容/ (J · (kg · K) ⁻¹)
线芯	400	8920	385
连接管	400	8920	385
高压屏蔽层	0.51	950	2500
三元乙丙橡胶应力锥	0.27	1180	1700
交联聚乙烯主绝缘	0.285	910	1640
绝缘屏蔽层	0.51	950	2500
硅橡胶增强绝缘	0.25	1150	1565
聚氨酯密封胶	0.35	980	1700
铜壳	400	8920	385

表 2 64/110 kV 电缆本体材料热力学参数

电缆本体结构	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)	恒压热容/ (J · (kg · K) ⁻¹)
线芯	400	8920	385
高压屏蔽层	0.51	950	2500
交联聚乙烯绝缘	0.285	910	1640
绝缘屏蔽层	0.51	950	2500
缓冲层	0.05	140	2120
铝护套	238	2700	900
外护层	0.17	200	2000

壤与空气的对流传热系数取值为 10 W/(m² · K); B 面、C 面和 D 面与中间接头或电缆本体的距离分别为 2000 mm,均将其设置为法向热通量为 0 的边界条件。仿真模型如图 3 和图 4 所示。

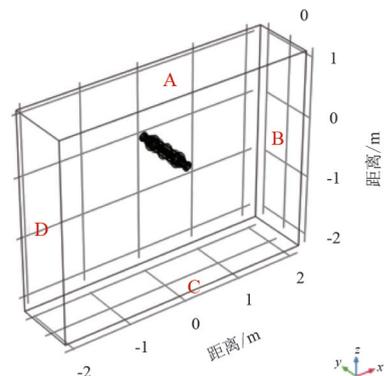


图 3 土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真模型

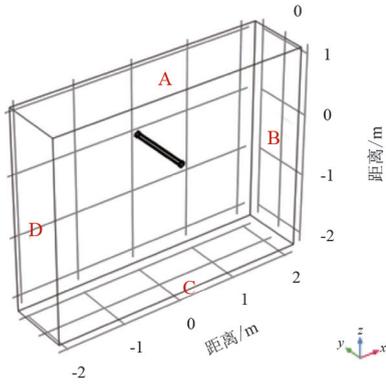


图4 土壤直埋 110 kV 电缆本体稳态载流量仿真模型

中间接头或电缆本体的内部热量主要来自电流引起的线芯发热。中间接头或电缆本体的温度场计算公式为:

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_1 \quad (2)$$

式中: Q 为线芯产生的焦耳热; I 为线芯电流有效值; t 为时间; Q_1 为材料吸收的焦耳热; ρ 为材料密度; C 为材料恒压热容; T 为材料温度; k 为材料导热系数; R 为线芯的电阻,计算公式如式(3)~式(7)所示^[13]。

$$R = R_0 \cdot L \quad (3)$$

$$R_0 = \frac{\rho_{20}}{S} [1 + \alpha(T - 293)] \quad (4)$$

$$R_1 = R_0(1 + y_s) \quad (5)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (6)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f \cdot 10^{-7}}{R_0} k_s \quad (7)$$

式中: R_0 为单位长度线芯在温度 T 时的直流电阻; L 为线芯长度; ρ_{20} 为线芯在温度 293 K 时的体积电阻率,其值为 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; S 为线芯截面积,其值为 1200 mm^2 ; α 为线芯在温度 293 K 时的温度系数,其值为 $3.93 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$; R_1 为单位长度线芯在温度 T 时的交流电阻; y_s 为集肤效应系数; x_s 为集肤效应中频率与导体结构影响系数; k_s 为系数,取值为 0.435; f 为电流频率,取值为 50 Hz。

1.3 网格剖分及计算方法

仿真中,在中间接头区域采用极细化网格剖分,在土壤区域采用超细化网格剖分,网格剖分平均单元质量为 0.68,网格单元格数量为 27 591 669。类似的,在电缆本体区域采用极细化网格剖分,在土壤区域采用超细化网格剖分,网格剖分平均单元质量为 0.69,网格单元格数量为 17 267 128。在中间接

头的线芯和连接管上施加电流有效值或在电缆本体的线芯上施加电流有效值,采用“稳态”计算分别获取不同条件下的中间接头或电缆本体稳态载流量。

2 中间接头和电缆本体载流量

2.1 环境温度

环境温度会显著影响中间接头和电缆本体的载流量。以电缆线芯最高运行温度 363 K 作为载流量的校核标准,计算了土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、敷设深度为 1.0 m 时,不同环境温度下的中间接头和电缆本体载流量,结果如图 5 所示。可以看出,不同环境温度下的中间接头载流量始终小于电缆本体载流量。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时,电缆本体载流量分别为 1520 A、1422 A、1323 A 和 1208 A,而对应环境温度下的中间接头载流量分别为 1385 A、1295 A、1199 A 和 1095 A,相同环境温度下的中间接头载流量相较于电缆本体下降了约 9%。

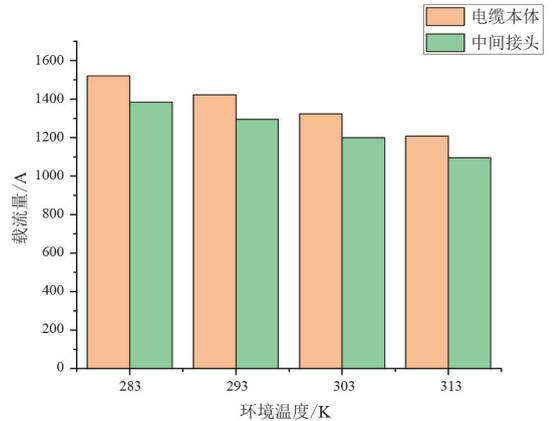


图5 不同环境温度下的中间接头与电缆本体载流量

为进一步研究中间接头与电缆本体载流量间差异对中间接头绝缘性能的影响,以本体载流量为实际运行过程中流经线芯的电流,计算了不同环境温度下中间接头的温度分布(土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、敷设深度为 1.0 m),如图 6 所示。

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,不同环境温度下的中间接头最高温度均明显高于 363 K。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时,中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 385.55 K、381.87 K、379.42 K 和 376.15 K。长期处于这一温度下的中间接头主绝缘老化速率会明显快于本体主绝缘,导致中间接头绝缘故障率偏高。故

在实际运行中建议按照中间接头载流量来校准电缆稳态载流量,以保障电缆安全稳定运行。

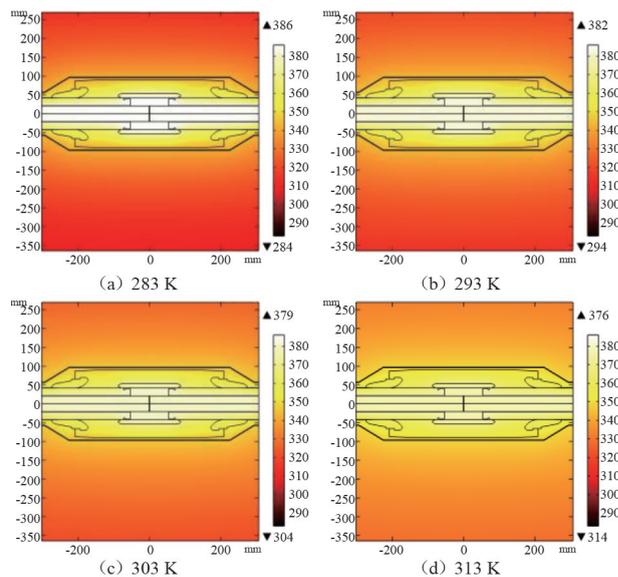


图 6 不同环境温度下的中间接头温度分布

2.2 土壤导热系数

土壤导热系数是影响电缆载流量的重要参数,随着土壤水分的蒸发,电缆散热效果会逐渐变差。在本节中,以线芯最高运行温度 363 K 作为载流量校核标准,计算了环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m 时,土壤导热系数对中间接头和电缆本体载流量的影响规律,如图 7 所示。显然,不同土壤导热系数下的中间接头载流量小于本体载流量。土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时的中间接头载流量分别为 1295 A、1525 A、1634 A 和 1698 A,相较于相同条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、8.3%、7.8% 和 7.5%。

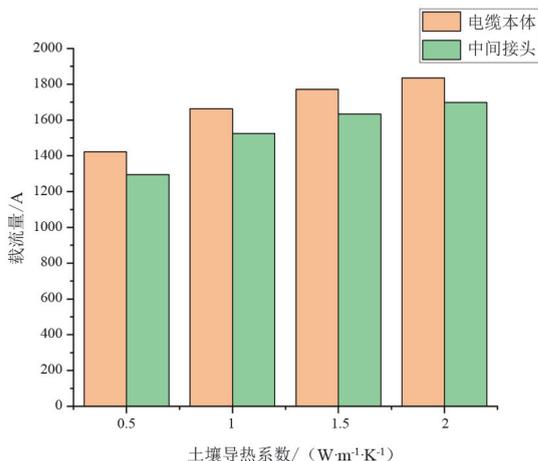


图 7 不同土壤导热系数下的中间接头与电缆本体载流量

类似的,以本体载流量为流经线芯的电流,研究了回填不同导热系数土壤时的中间接头温度分布(环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m),如图 8 所示。

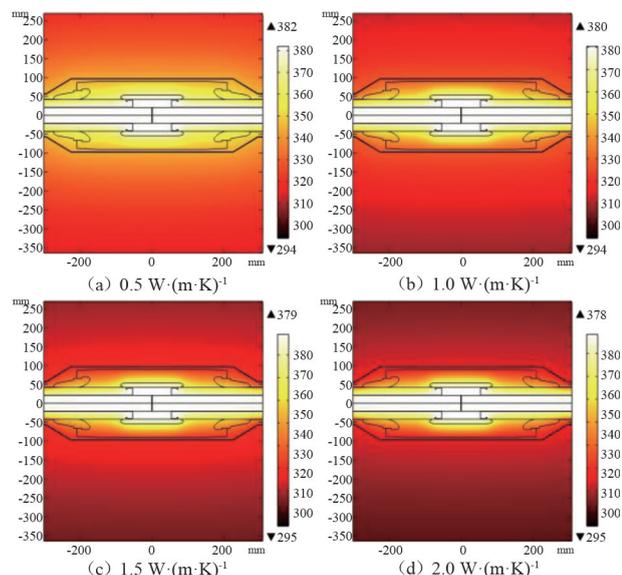


图 8 不同土壤导热系数下的中间接头温度分布

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,中间接头最高温度随土壤导热系数的增加而略有降低。土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时的中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 381.87 K、380.27 K、379.00 K 和 378.19 K。

由于中间接头的复杂结构,如按照本体载流量校核电缆载流能力,将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态,因此为确保电缆长期稳定运行,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

2.3 敷设深度

电缆敷设深度会一定程度影响直埋电缆的散热过程,在本节中,以线芯最高运行温度 363 K 作为载流量校核标准,计算了环境温度为 293 K、土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,敷设深度对中间接头和电缆本体载流量的影响规律,如图 9 所示。可以看出,敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时的中间接头载流量分别为 1295 A、1265 A、1241 A 和 1222 A,相较于对应条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、10.2%、10.5% 和 10.8%。

类似的,以本体载流量为流经线芯的电流,研究了不同敷设深度时的中间接头温度分布(环境温度为 293 K、土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),如图 10 所示。

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,

中间接头最高温度随敷设深度的增加而增加。敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时的中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 381.87 K、385.20 K、386.13 K 和 386.90 K。上述研究表明,为确保电缆主绝缘长期稳定可靠,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

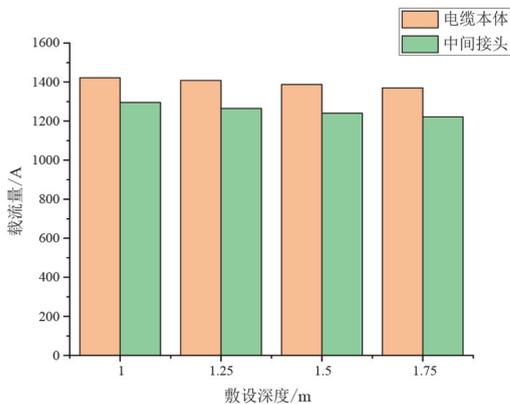


图9 不同敷设深度下的中间接头与电缆本体载流量

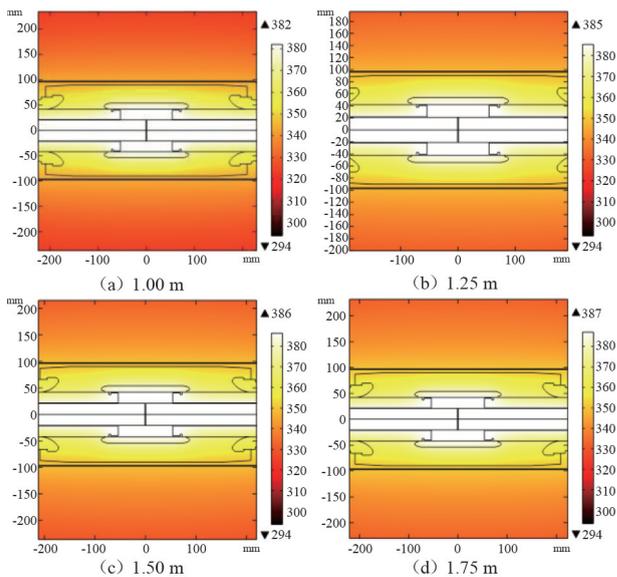


图10 不同敷设深度下的中间接头温度分布

3 结论

上面搭建了土壤直埋 110 kV 中间接头和电缆本体稳态载流量仿真模型,对比研究了环境温度、土壤导热系数和敷设深度对中间接头和电缆本体稳态载流量的影响规律,得到的主要结论如下:

1) 不同环境温度下的中间接头载流量始终小于本体载流量。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时(土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、敷设深度为 1.0 m),中间接头载流量较相同环境温度下的

本体载流量减小了约 9%。

2) 不同土壤导热系数下的中间接头载流量小于本体载流量。土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时(环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m)的中间接头载流量相较于相同条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、8.3%、7.8% 和 7.5%。

3) 不同敷设深度下的中间接头载流量小于本体载流量。敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时(环境温度为 293 K、土壤导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)的中间接头载流量相较于对应条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、10.2%、10.5% 和 10.8%。

4) 由于中间接头的复杂结构,如按照本体载流量校核电缆载流能力,将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态,为确保电缆长期稳定运行,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

参考文献

- [1] 魏艳慧,郑元浩,龙海泳,等.绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J].电工技术学报,2022,37(15):3932-3940.
- [2] 王彦楠,李铮,杨鹏飞,等.基于电磁热多场耦合的直埋电缆导体温度与载流量计算[J].计量学报,2022,43(7):877-884.
- [3] 何宏源,金妮.IEC 标准下电缆实际载流量的计算研究[J].东北电力技术,2022,43(4):1-3.
- [4] Electric Cables-Calculation of the current rating-Part1-2: Current rating equations(100% load factor) and calculations of loss-sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation; IEC 60287-1-2; 2023[S/OL]. [2022-05-13]. <http://webstore.iec.ch/publication/68120>.
- [5] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆载流量计算:JB/T 10181.11—2014[S].北京:机械工业出版社,2015.
- [6] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [7] HEINHOLD L, STUBBE R (Hrsg). 电力电缆及电线[M].崔国璋等,译.北京:中国电力出版社,2001.
- [8] 郑元浩.高压直流电缆主绝缘老化特性及电-热耦合仿真研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.
- [9] 赵学风,郝一帆,黄国强,等.基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J].高压电器,2022,58(3):64-70.

1) 结合 IEC 62751-2, 给出了 MMC 换流阀损耗计算方法和关键计算参数的获取方法。

2) 针对典型直流电压和输送容量的 ± 320 kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程, 建立电磁暂态仿真模型计算了送端换流站和受端换流站的损耗率, 计算结果表明总损耗中器件导通损耗约占 70%, 开关损耗约占 22%, 均压电阻和电容器损耗约占 8%。送受端换流站换流阀总损耗率为 1.078%。

3) 研究了 MMC 换流阀损耗率的影响因素, 计算结果表明: 联接变压器阀侧注入三次谐波电压幅值越大, 换流阀损耗越小; 换流器调制比越大, 换流阀损耗越小; 在给定容量的情况下, 提高直流极线电压, 可以降低换流阀损耗。

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] 李翔宇, ABEYNAYAKE G, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
- [3] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.
- [4] 彭穗, 余浩, 许亮, 等. 海上风电场输电方式研究[J]. 电力勘测设计, 2021(11): 68-75.
- [5] 沙志成, 张丹, 赵龙. 大规模海上风电并网方式的研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(2): 158-161.
- [6] 范声芳. 模块化多电平变换器(MMC)若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [7] 刘建涛, 王治华, 王珂. 不同结构电压源换流器损耗对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 105-110.
- [8] 张哲任, 徐政, 薛英林. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 34(6): 109-116.

- [9] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.
- [10] 李强, 庞辉, 贺之渊. 模块化多电平换流器损耗与结温的解析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 85-91.
- [11] 王希平, 李志刚, 姚芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1636-1646.
- [12] 易阳, 叶荣, 林章岁. 柔性直流输电系统损耗计算方法及其实测分析[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 125-133.
- [13] 熊岩, 杨柳, 钟伟华, 等. 柔性直流换流阀功率模块损耗测量与试验[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 17-35.
- [14] 王海田, 汤广福, 贺之渊, 等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 112-118.
- [15] 杨立敏, 李耀华, 王平, 等. 适用于 ± 500 kV/3000 MW 柔性直流输电换流器的电路拓扑损耗特性研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(6): 1-8.
- [16] 李标俊, 向权舟, 姚传涛, 等. 柔直换流阀损耗解析计算及其误差分析[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 78-84.
- [17] 赵宇含, 王鑫, 赵成勇, 等. 半桥-全桥子模块混合型 MMC 的换流阀损耗分析方法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2847-2855.
- [18] 罗永捷, 宋勇辉, 熊小伏, 等. 高压大容量 MMC 换流阀损耗精确计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7730-7741.
- [19] 荣飞, 黄韬, 饶宏, 等. MMC 换流阀最优三次谐波注入方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 20-26.

作者简介:

李浩原(1987), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、换流站绝缘配合等;

彭开军(1970), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、电力工程设计及设计管理等;

王江天(1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护。
(收稿日期: 2023-01-30)

(上接第 11 页)

- [10] 郑雁翎, 孙晓娟, 李维新, 等. 穿过不利散热区域地下电力电缆周期负荷因数的研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 128-134.
- [11] 李长云, 孙丰田. 计及套管内气-液介质流体特性的高压直流电缆终端优化模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4871-4883.
- [12] 刘英, 陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报,

2022, 42(4): 1260-1271.

- [13] 邓显波, 欧阳本红, 孔祥海, 等. 大截面高压电缆导体交流电阻的优化[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 522-527.

作者简介:

陈莉(1985), 女, 硕士, 研究方向为电气工程及其自动化;

邵千秋(1991), 男, 博士, 研究方向为电缆缺陷检测。

(收稿日期: 2023-02-15)