

电线电缆

WIRE & CABLE

主办单位:上海电缆研究所有限公司
1958年创刊, 线缆行业学术交流平台

- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- 中国期刊全文数据库全文收录期刊
- 中文科技期刊数据库(全文版)收录期刊
- CACJ中国应用型入库期刊



ISSN 1672-6901
CN 31-1392/TM



网址: jwc.cwc.net.cn

邮箱: wirecable@secri.com

电话: 021-5117 9609

敷设间距对交联聚乙烯交流海底电缆载流量的影响

孙艳雨 薛驰 王文超 王丽媛 赵囿林 谢卫祥 张亮亮

Effect of Laying Spacing on Current Carrying Capacity of Cross Linked Polyethylene AC Submarine Cables

SUN Yanyu, XUE Chi, WANG Wenchao, WANG Liyuan, ZHAO Youlin, XIE Weixiang, ZHANG Liangliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海底电缆暂态载流量计算与优化选型

Transient Current Carrying Capacity Calculation and Optimization Selection of Subsea Cables

电线电缆. 2021, 64(4): 23-25,28 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.04.006>

220 kV电力电缆提高载流量的方法

Method of Improving Current Carrying Capacity of 220 kV Power Cable

电线电缆. 2022, 65(1): 26-28 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202201006>

高压直流电缆直流载流量计算和验证

Calculation and Verification of HVDC Cable on the Current Carrying Capacity

电线电缆. 2021, 64(5): 24-27 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.05.007>

直埋直流电缆中间接头稳态载流量计算

Calculation of Steady-State Current Carrying Capacity of Intermediate Joint of Direct Buried DC Cable

电线电缆. 2020, 63(6): 30-34 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.06.008>

三芯500 kV XLPE绝缘交流海底电缆设计及关键技术

Design and Critical Technologies of 500 kV Three-Core XLPE Insulated AC Submarine Cable

电线电缆. 2025, 68(4): 24-30 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240208>

基于负荷电流计算交流海底电缆铠装接地电流的方法

A Method for Calculating Grounding Current of AC Submarine Cable Armor Based on Load Current

电线电缆. 2024, 67(6): 35-40 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202406007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



孙艳雨, 薛驰, 王文超, 等. 敷设间距对交联聚乙烯交流海底电缆载流量的影响[J]. 电线电缆, 2025, 68(6): 29-34.

SUN Y Y, XUE C, WANG W C, et al. Effect of laying spacing on current carrying capacity of cross linked polyethylene AC submarine cables[J]. Wire & Cable, 2025, 68(6): 29-34.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240220

敷设间距对交联聚乙烯交流海底电缆载流量的影响

孙艳雨, 薛驰, 王文超, 王丽媛, 赵园林, 谢卫祥, 张亮亮

(中天科技海缆股份有限公司, 南通 226010)

摘要: 在国家双碳政策的引导下, 海上风电迎来高速发展的黄金时期。同时, 随着海洋资源开发逐渐向深远海发展, 海底电缆的敷设及运行环境也愈加复杂。受海洋路由资源及施工的影响, 海底电缆的敷设间距有所差异, 对其载流量的影响也不尽相同, 因此有必要进行常规工况下不同敷设间距对海底电缆载流量的影响分析。基于 IEC 60287-1-1: 2023, 以 220 kV 交联聚乙烯 (cross linked polyethylene, XLPE) 交流海底电缆常规敷设工况为例, 采用 CYMCAP 软件进行电缆载流量计算分析。结果表明, 海底直埋工况下, 电缆载流量随敷设间距的减小而降低, 且其降低幅度随敷设间距的减小而增大。陆上电缆沟工况下, 受敷设环境尺寸设计限制, 敷设间距对海底电缆载流量的影响长期存在, 且影响程度随电缆沟尺寸的增大而逐渐减弱; 当敷设间距小于 1 倍的电缆直径时对电缆载流量的影响最大, 而当敷设间距大于 1 倍的电缆直径时对电缆载流量的影响基本稳定。

关键词: 海底电缆; 载流量; 敷设环境; CYMCAP

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)06-0029-06

0 引言

近年来, 海上风电飞速发展, 海底电缆作为海上风电的重要组成部分, 为适应深远海资源勘探开发及平价上网的发展趋势, 满足产业链升级改造的需求, 在大长度、大水深、大容量、高电压、低成本等方面有了更高的要求。海底电缆降本是必然趋势, 在此前提下, 精准的稳态载流量计算对海底电缆的截面选型设计、成本优化, 以及输电线路可靠性的提高有重要意义。

海上风电场装机容量大幅提升, 从 2014 年首个采用三芯 220 kV 海底电缆海上风电项目 200 MW 的装机容量提升至目前的 1000 MW。单根海底电缆难以满足需求, 需要采用多回路海底电缆, 在提升传输容量和载流能力的同时, 增加电力系统的冗余度。当对其中一根线缆进行维修或更换时, 其他线缆可以继续承担电力传输任务, 从而避免由单一线缆故障引起的供电中断问题, 可显著提升电力系统的可用性和维护效率。但是, 多回路海底电缆建设需要占用更多的海洋路由资源。根据 GB/T 51190—2016《海底电力电缆输电工程设计规范》, 海底电缆路由应与海洋功能区、海洋开发活动及规划相适应, 使其相互影响最小; 同时, 路由宽度宜考虑远期规划

需要, 从节约海洋路由资源考虑, 应不断探索缩小海底电缆间距的技术措施。虽然缩小海底电缆敷设间距可以有效提高路由资源的利用率, 但同时也会大幅提升施工难度。敷设间距过小, 会导致海底电缆发热, 进而降低载流能力。综上, 合理确定敷设间距对海上风电建设至关重要^[1-6]。

目前, 载流量计算采用的传统解析法缺乏对海底电缆敷设间距影响的准确考虑^[7-10]。在此背景下, 本文对三芯 220 kV 交联聚乙烯 (cross linked polyethylene, XLPE) 交流海底电缆在不同工况下的载流量进行对比分析, 选取海底电缆输电路径中占比较大的海底直埋和陆上电缆沟两种敷设环境, 在相同环境温度、相同敷设深度、相同回路数下建立海底电缆稳态热路模型, 研究不同敷设间距对海底电缆载流量的影响。

1 220 kV 海底电缆结构及参数

海底电缆的电压等级不断提升, 向着三芯 330, 500 kV 等更高电压等级发展, 而海上风电场主送出回路目前仍以三芯 220 kV 交流海底电缆为主。单个回路 220 kV 海底电缆的传输容量存在上限, 根据未来深远海、大容量海上风电的发展趋势, 单个风电场中多回路 220 kV 海底电缆

的应用将更加广泛。

本文以三芯 220 kV 交流光纤复合海底电缆为研究对象, 型号为 HYJQF41-F 127/220 kV 3×500/800/1 000 mm²+2×48B1, 其结构主要由阻水导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、半导体电阻水层、金属护层、非金属护层、填充、复合光单元、内衬层、铠装层、外被层等部分组成, 结构示意图及其结构参数分别见图 1 和表 1。

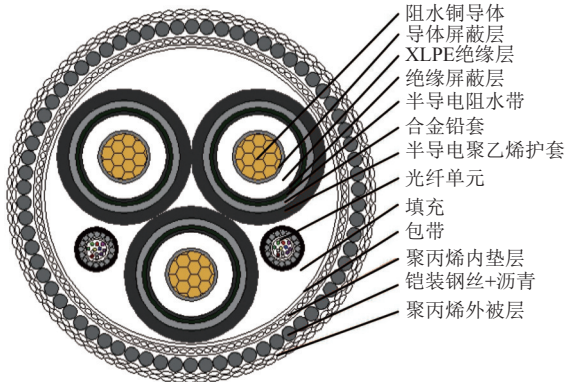


图 1 三芯 220 kV 交流光纤复合海底电缆的结构示意图
Fig.1 Structure schematic diagram of three-core 220 kV AC fiber composite submarine cable

2 基于 CYMCAP 的载流量计算

采用解析法计算海底电缆的载流量, 主要参考 Neher-McGrath 方法 (简称 N-M 方法) 和 IEC 60287-1-1: 2023 中公式对海底电缆的电阻、损耗、热阻等参数进行计算^[11-12]。基于电缆的等效热传输模型, 推导出电缆恒定负载流量的计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{\theta - \theta_0 - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (1)$$

式中: I 为所求海底电缆的载流量, A; n 为海底电缆的芯数; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为单位长度海底电缆的绝缘层、内衬层、外被层和外部媒质层热阻, $K \cdot m \cdot W^{-1}$; θ 、 θ_0 分别为海底电缆线芯温度及其环境温度, $^{\circ}C$; W_d 为每相单位长度海底电缆的介质损耗, $W \cdot m^{-1}$; R 为工作温度下导体的交流电阻, $\Omega \cdot m^{-1}$; λ_1 、 λ_2 分别为金属护套和铠装层的损耗因数。

IEC 60287-1-1: 2023 基于纯公式的计算方法, 具有过程直观、简单明了的优点, 且标准公开发布, 便于研究人员开发低成本的载流量计算软件^[4]。但是, 该标准只适用于简单的电力系统, 对于大水深、多回路线缆敷设等复杂工况,

表 1 不同标称截面积的三芯 220 kV 交流光纤复合海底电缆的结构参数

Tab.1 Structural parameters of three-core 220 kV AC fiber composite submarine cables with different nominal cross-sections mm

结构名称	参数指标		
	3×500 mm ²	3×800 mm ²	3×1 000 mm ²
阻水导体直径	26.1	34.0	38.1
内屏蔽	厚度	1.9	1.9
	直径	29.9	37.8
绝缘	厚度	27.0	25.0
	直径	83.9	87.8
外屏蔽	厚度	1.2	1.2
	直径	86.3	90.2
半导体电阻水带	厚度	1.0	1.0
	直径	88.3	92.2
铅套	厚度	3.5	3.6
	外径	95.3	99.4
聚乙烯护套	厚度	3.3	3.3
	外径	101.9	106.0
成缆外径	220.1	229.0	234.4
包带厚度	厚度	0.3	0.3
	厚度	1.5	1.5
聚丙烯内衬层	厚度	1.5	1.5
	外径	224.0	232.9
铠装金属丝	直径	6.0	6.0
	根数	109±5	113±5
铠装后外径	236.0	244.9	250.3
沥青+外护层厚度	0.5+4.0	0.5+4.0	0.5+4.0
外护层直径	245.0	253.9	259.3

其计算误差较大, 并不适用于此类工程项目。

采用 CYMCAP 软件对交流和直流电力电缆的载流量进行计算。针对常见的敷设方式, 软件可为各电压等级电缆提供载流量稳态分析和瞬态分析。该软件的主要理论依据包括 IEC 60287-1-1: 2023、IEC 60853 系列标准、IEC 60949 系列标准、IEC 1042: 1991 及 N-M 理论等。相对于单一的 IEC 标准, CYMCAP 软件具有更精确的计算算法, 能够提供丰富的分析功能, 其部分研究成果被国际电工委员会采纳, 作为相关标准的修正和补充^[13]。

基于 CYMCAP 软件进行载流量计算时, 根据表 1 中海底电缆的结构参数对不同横截面积

三芯 220 kV 交流光纤复合海底电缆进行建模, 设置电缆结构、敷设条件和电压等级等参数, 即可进行仿真计算, 获得电缆的载流量、损耗、温度、电阻和热阻等结果^[14]。

3 不同敷设间距对载流量的影响

以常规海底电缆敷设工况为例, 选取海底直埋和陆上电缆沟两种敷设环境, 在相同环境温度、相同敷设深度、相同回路数下研究不同敷设间距对载流量的影响。

3.1 海缆直埋

海底电缆所处海床的环境温度为 25 °C, 埋

设深度分别为 5.0, 10.0, 15.0 m, 海床中热阻系数为 $0.7 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$, 敷设间距为 1~50 m (以海底电缆边界为准), 1~10 m 之间以 1 m 为单位递增, 10~50 m 之间以 5 m 为单位递增, 计算不同敷设间距下不同横截面海底电缆的载流量, 变化曲线分别见图 2~图 4。

由图 2~图 4 可知, 在海底直埋敷设工况下, 海底电缆敷设间距在 10 m 内时对载流量的影响较大, 且影响程度随着敷设间距的增大而减小; 超出 10 m 范围后对载流量的影响较小; 50 m 后基本无影响。

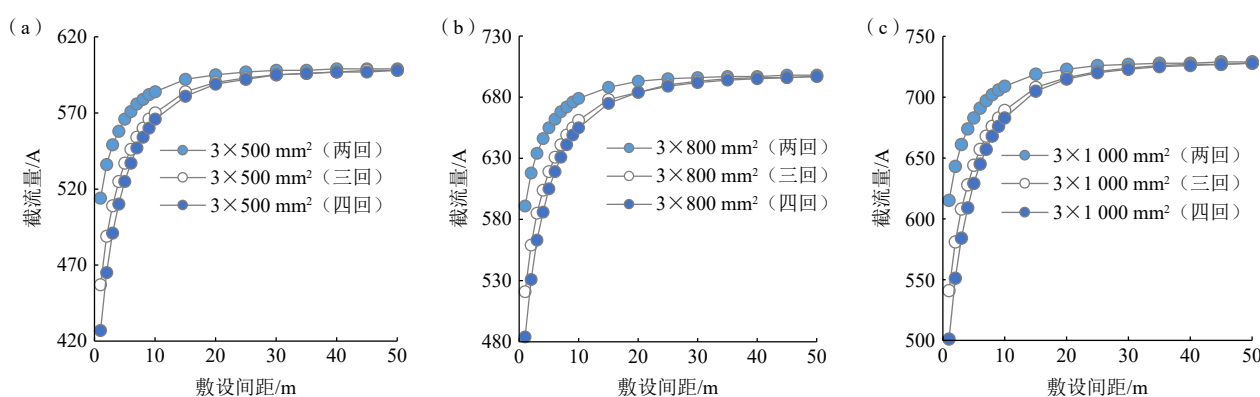


图 2 海底直埋深度为 5.0 m 时不同敷设间距下不同横截面海底电缆的载流量: (a) 500 mm^2 ; (b) 800 mm^2 ; (c) 1000 mm^2

Fig.2 Current carrying capacity of submarine cables with different cross-sectional areas under different laying spacing at direct burial depth of 5.0 m: (a) 500 mm^2 ; (b) 800 mm^2 ; (c) 1000 mm^2

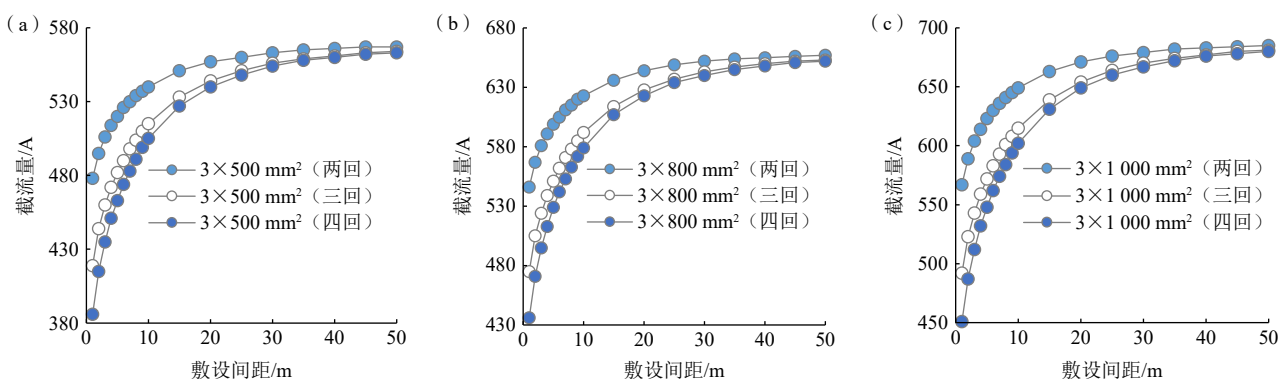


图 3 海底直埋深度为 10.0 m 时不同敷设间距下不同横截面海底电缆的载流量: (a) 500 mm^2 ; (b) 800 mm^2 ; (c) 1000 mm^2

Fig.3 Current carrying capacity of submarine cables with different cross-sectional areas under different laying spacing at direct burial depth of 10.0 m: (a) 500 mm^2 ; (b) 800 mm^2 ; (c) 1000 mm^2

3.2 陆上电缆沟

海底电缆登陆后所处电缆沟的环境温度为 45 °C, 电缆沟尺寸分别为 2.0 m (宽)×1.0 m (深) 和 1.0 m (宽)×1.0 m (深), 覆土深度为 0.5 m, 土壤热阻系数为 $1.2 \text{ km}\cdot\text{W}^{-1}$, 其敷设间距由 0 m 到 1.0 m

(以海底电缆边界为准), 0~0.4 m 之间以 0.05 m 为单位递增, 0.4~1.0 m 之间以 0.2 m 为单位递增, 计算不同敷设间距下不同横截面海底电缆的载流量, 变化曲线分别见图 5 和图 6。

由图 5 和图 6 可知, 在陆上电缆沟敷设工况

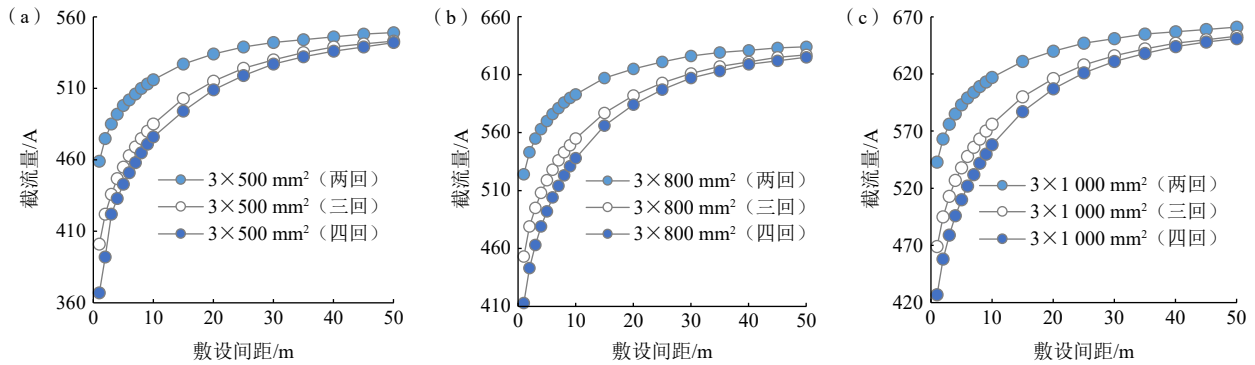


图4 海底直埋深度为15.0 m时不同敷设间距下不同横截面积海底电缆的载流量: (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

Fig.4 Current carrying capacity of submarine cables with different cross-sectional areas under different laying spacing at direct burial depth of 15.0 m: (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

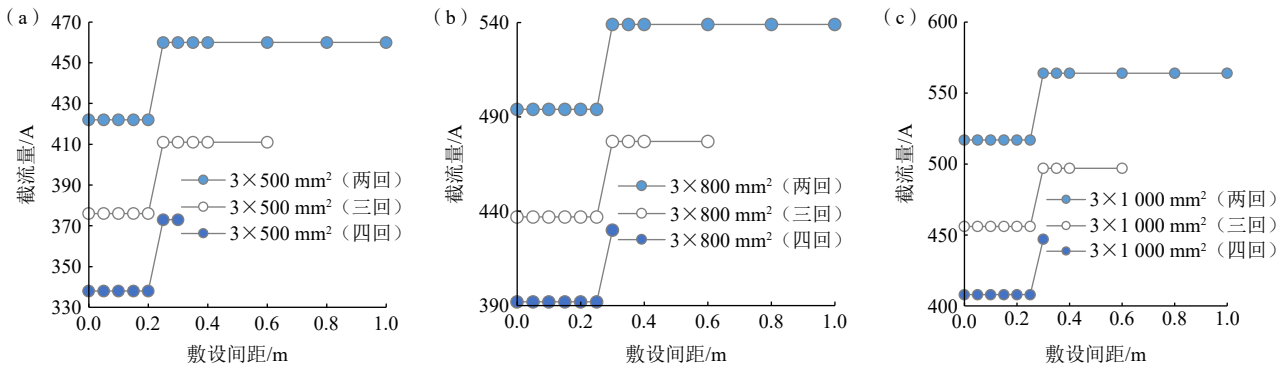


图5 陆上电缆沟尺寸为2.0 m (宽)×1.0 m (深)时不同敷设间距下不同横截面积海底电缆的载流量: (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

Fig.5 Current carrying capacity of submarine cables with different cross-sectional areas under different laying spacing at onshore cable trench sizes of 2.0 m (width) × 1.0 m (depth): (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

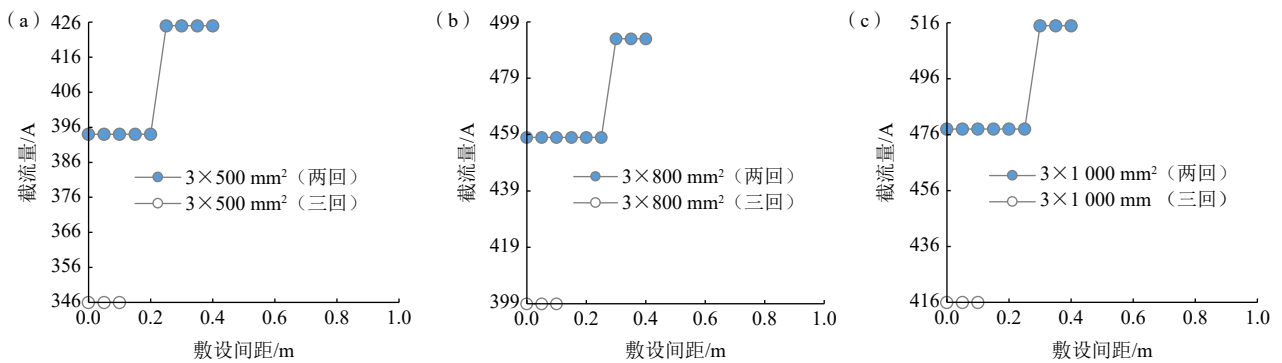


图6 陆上电缆沟尺寸为1.0 m (宽)×1.0 m (深)时不同敷设间距下不同横截面积海底电缆的载流量: (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

Fig.6 Current carrying capacity of submarine cables with different cross-sectional areas under different laying spacing at onshore cable trench sizes of 1.0 m (width) × 1.0 m (depth): (a) 500 mm²; (b) 800 mm²; (c) 1 000 mm²

下,受敷设环境中电缆沟尺寸设计限制,电缆沟内整体散热较差,敷设间距对海底电缆载流量的影响长期存在,且影响程度随着电缆沟尺寸的增大而减小。在电缆沟尺寸固定的条件下,海底电缆的敷设间距在小于1倍的电缆直径时对载流量的影响最大;敷设间距大于1倍的电缆直径

时,由于电缆沟内热量分布均匀,对载流量的影响基本稳定。

4 结论

文章基于CYMCAP软件建立海底电缆计算模型,对220 kV海底电缆不同工况多回路条件

下不同敷设间距海底电缆的载流量进行对比分析, 得出以下结论。

1) 敷设间距对海底电缆载流量的影响受敷设环境和散热条件的制约。

2) 海底直埋条件下, 敷设间距对海底电缆载流量的影响是局部的, 且影响程度随敷设间距的增加越来越小。在规划海底电缆路径时, 若条件允许, 可在 10 m 内适当增大敷设间距, 以提升载流量。若环境允许且考虑海水流动散热效应, 可适当放宽敷设间距要求, 但需要结合具体水文条件评估。

3) 陆上电缆沟条件下, 敷设间距对海底电缆载流量的影响更为持久, 且与沟内整体散热性能密切相关。设计电缆沟时, 应优先考虑增大电缆沟尺寸, 以改善散热, 降低敷设间距对载流量的敏感度。在固定尺寸的电缆沟内, 应特别注意控制电缆的敷设间距, 尤其避免小于 1 倍电缆直径的紧密排列, 以保障载流量。

参考文献 References

- [1] 黄小卫, 李晓骏, 左干清. 国内外海底电缆工程现状及展望 [J]. *电线电缆*, 2023(1): 1-6.
HUANG X W, LI X J, ZUO G Q. Application status and prospect of submarine cable projects at home and abroad[J]. *Wire & Cable*, 2023(1): 1-6.
- [2] 王绍则, 于银海, 崔占明, 等. 岸电工程海底电缆穿越航道敷设方案设计 [J]. *天然气与石油*, 2020, 38(4): 94-101.
WANG S G, YU Y H, CUI Z M, et al. Design for laying cable across shipping channel for submarine cable supplying power to nearshore platforms[J]. *Natural Gas and Oil*, 2020, 38(4): 94-101.
- [3] 李欢, 魏磊, 张延伟, 等. 沟道敷设电力电缆温度场与载流量仿真研究 [J/OL]. [2025-06-15]. 哈尔滨理工大学学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1404.N.20241122.1035.013.html>.
LI H, WEI L, ZHANG Y W, et al. Simulation study on temperature field and current-carrying capacity of power cable in trench laying mode[J/OL]. [2025-06-15]. Journal of Harbin University of Science and Technology. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1404.N.20241122.1035.013.html>.
- [4] 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, 33(23): 146-149.
ZHENG M, HU Q N, LIU G. Comparative analysis of the download traffic of 110 kV submarine cable with different laying modes[J]. *Electrotechnical Application*, 2014, 33(23): 146-149.
- [5] 王仲, 唐盈盈, 贾利川. 垂直洋流下 500 kV 海缆电热耦合场和载流量研究 [J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 140-149.
WANG Z, TANG Y Y, JIA L C. Electric-thermal coupling and ampacity of 500 kV DC submarine cable under the action of vertical ocean currents[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 140-149.
- [6] 邓阳. 基于电磁-热耦合的电缆计算模型的金属护套损耗对载流量的影响 [J]. *电力设备管理*, 2024(15): 201-203.
DENG Y. Effect of metal sheath loss on current carrying capacity based on electromagnetic-thermal coupling cable calculation model[J]. *Electric Power Equipment Management*, 2024(15): 201-203.
- [7] 陈仁刚. 电力电缆载流量影响因素分析及敷设方式优化方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
CHEN R G. Analysis of cable ampacity influencing factors and study on the optimization method of cable laying scheme[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [8] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 等. 基于有限元法的 XLPE 电缆载流量计算及其影响因素分析 [J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(5): 72-77.
WANG Y Y, CHEN R G, CHEN W G, et al. Calculation of the ampacity of XLPE power cable based on FEM and analysis of the influential factors[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5): 72-77.
- [9] 曲名新, 邓少平, 翟学, 等. 基于电-热-流多场耦合仿真的海底电缆载流量分析 [J]. *电力勘测设计*, 2022(7): 17-24.
QU M X, DENG S P, ZHAI X, et al. Ampacity analysis of submarine cable based on electric-thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2022(7): 17-24.
- [10] 李华, 杨文斌, 施朝晖, 等. 光伏发电系统中直埋敷设中压电缆的周期性负载流量计算研究 [J]. *太阳能*, 2022(7): 81-86.
LI H, YANG W B, SHI Z H, et al. Study on calculation of periodic load ampacity of directly buried medium voltage cables in PV power generation system[J]. *Solar Energy*, 2022(7): 81-86.
- [11] 张皓, 李鹏飞, 马国庆, 等. 典型敷设环境下超高压交流 XLPE 海底电缆载流量分析 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6): 154-162.
ZHANG H, LI P F, MA G Q, et al. Ampacity analysis of extra-high voltage XLPE submarine cable in typical layout environments[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6): 154-162.
- [12] 徐琪铭. 考虑电缆温升影响的局部放电信号传播特性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

- XU Q M. Research on the propagation characteristics of partial discharge signals considering the impact of cable temperature rise[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [13] 夏峰, 单潜瑜, 赵远涛, 等. 海底电缆暂态载流量计算与优化选型 [J]. *电线电缆*, 2021(4): 23-25.
- XIA F, SHAN Q Y, ZHAO Y T, et al. Transient current carrying capacity calculation and optimization selection of subsea cables[J]. *Wire & Cable*, 2021(4): 23-25.
- [14] 苏锦媚, 唐永卫, 陈元林. 复合海缆载流量计算方法研究与对比 [J]. *现代计算机 (专业版)*, 2018(24): 26-31.
- SU J M, TANG Y W, CHEN Y L. Research and comparison of calculation methods for current carrying capacity of composite submarine cables[J]. *Modern Computer*, 2018(24): 26-31.

收稿日期: 2024-12-10

修回日期: 2025-01-02

作者简介: 孙艳雨 SUN Yanyu

1998—, 女, 工程师

主要从事海底电缆研发和工艺研究工作

E-mail: sunyy@ztt.cn

Effect of Laying Spacing on Current Carrying Capacity of Cross Linked Polyethylene AC Submarine Cables

SUN Yanyu, XUE Chi, WANG Wenchao, WANG Liyuan, ZHAO Youlin,
XIE Weixiang, ZHANG Liangliang

(Zhongtian Technology Submarine Cable Co., Ltd., Nantong 226010, China)

Abstract: Under the guidance of the national dual carbon policy, China's offshore wind power industry has ushered in a golden age of rapid development. At the same time, with the development of marine resources gradually developing into deep-sea, laying and operating environment of submarine cables are becoming more and more complex. Due to the impact of marine routing resources and construction, laying spacing of submarine cables is different, and the impact on its current carrying capacity is also different. It is necessary to analyze the influence of different laying spacing on current carrying capacity of submarine cables under complex working conditions. Based on IEC 60287-1-1: 2023, conventional laying conditions of 220 kV AC cross linked polyethylene (XLPE) submarine cables were taken as an example, and CYMCAP software was used to calculate and analyze current carrying capacity. Results showed that current carrying capacity of the cable decreased with the decrease of laying spacing, and decreasing range increased with the decrease of laying spacing. Under the conditions of land cable trench, due to space constraints in the laying environment, laying spacing had a long-term influence on current carrying capacity of submarine cables, and the influence degree decreased with the increase of cable trench size. When laying spacing was less than 1 times of cable diameter, the influence of current carrying capacity was the largest, and when the distance was greater than 1 times of cable diameter, the influence of current carrying capacity was basically stable.

Key words: submarine cable; current carrying capacity; installation environment; CYMCAP