・数智技术应用・

DOI:10.16105/j.dxdl.1672-6901.202404007

基于 SIMULINK 仿真的海上风电用海缆 行波法故障定位

孙兆恒¹, 李 宁¹, 祁 雷¹, 张永明², 杨建军², 朱嵘华^{3*}

(1. 渤海石油航务建筑工程有限责任公司,天津 300452;2. 宁波东方电缆股份有限公司,宁波 315000;3. 浙江大学 海洋学院,舟山 316021)

摘 要:随着海上风电产业的迅速发展,大量海缆被应用于海上风电场中,承担信息与电力的传输任务。海缆 出现故障将严重影响海上风电场的正常运行,对海缆进行故障定位研究具有重要意义。基于 SIMULINK 仿 真平台,模拟海缆不同故障类型下的行为;同时,模拟特定位置故障,并利用行波法提取故障后的暂态行波信 号获得正向和反向行波。采用单端行波定位和双端行波定位两种算法,依据行波到达时间差可确定故障位 置。结果显示,单端行波法和双端行波法均能够有效定位故障,其中双端行波法的定位精度更高,故障点距离 测量端较远时定位结果更加准确。

文章编号:1672-6901(2024)04-0037-05

Traveling Wave Method Fault Location of Offshore Wind Power Submarine Cables Based on SIMULINK Simulation

SUN Zhaoheng¹, LI Ning¹, QI Lei¹, ZHANG Yongming², YANG Jianjun², ZHU Ronghua^{3*}

(1. Bohai Oil Harbor Construction Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China;

2. Ningbo Orient Wires & Cables Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: With the rapid development of offshore wind power industry, a large number of submarine cables are used in offshore wind farms, undertaking the task of transmitting information and electricity. Failure of submarine cables will have a significant impact on the normal operation of offshore wind farms which would be seriously affected. Therefore, research on fault location for submarine cables is of great importance for stable operation of offshore wind fields. Based on SIMULINK simulation platform, behavior of submarine cable circuits under different fault types was simulated, and fault points at specific locations for simulation were set. During simulation process, traveling wave method was used to extract transient traveling wave signals after the fault to obtain forward and reverse traveling waves. Two algorithms, single-end traveling wave location and double-end traveling wave arrival. Results showed that both single-end and double-end traveling wave methods could effectively locate the fault point, with double-end traveling wave method demonstrating higher location accuracy, especially when the fault point was far from the measuring end.

Key words: offshore wind power; submarine cable; fault location; traveling wave method

0 引 言

海上风电是通过在海上风力发电机组,利用海洋风能资源进行发电的可再生能源技术。海上风电

收稿日期:2023-10-17

作者简介:孙兆恒(1983—),男,高级工程师。

具有资源丰富、风速稳定、占地少、噪音小、环境影响 小等优点,是目前全球能源转型和低碳发展的重要 途径之一^[1]。此外,我国海上风电场一般靠近东部 沿海经济发达地区,便于电力的传输和使用,可提高 风力发电的利用率^[2]。伴随海上风电的快速发展, 以及海上风电场的大规模建设,海上风电场用海缆 的需求也随之增长。在海上风电场中,海缆用于传

^{*} 通信作者:zhu. richard@zju. edu. cn

2024 年第 4 期	电线电缆	2024 年 8 月
No. 4 2024	Wire & Cable	Aug.,2024

输电力和信息,是风电场不可或缺的重要组成部 分^[3]。海上风电场用海底电缆主要包括集电线路 海缆和送出海缆。多台风力机组所产生的电能通过 集电线路海缆汇总至升压站,提高电压等级,然后通 过高压送出海缆传输至岸上集控中心。其中,集电 线路海缆的电压等级通常为 35 kV,而送出海缆的 电压等级取决于海上风电场的离岸距离。根据海上 风电场接入电网的要求,送出海缆的电压等级可选 择 110 kV 或 220 kV^[46]。

与陆上风电场相比,海上风电场面临的环境更 恶劣,目海水具有腐蚀性,海缆的施工和维护工作更 具挑战。在海上风电场的建设和运营中,海缆的施 工、建设和维护至关重要。海缆的使用环境具有隐 蔽性,难以及时监测海缆在使用期间的工作状态。 目前,海上风电场的建设正逐步向深远海方向发展, 深远海水深浪大,环境更为恶劣,敷设的海缆也会受 到更强的流体作用[7]。海水中的生物和化学成分 也具有腐蚀性,影响海缆正常运行^[8-9]。一旦海缆发 生故障,会对海上风电场正常的电力传输产生较大 的影响。与陆上电缆相比,海缆的检修更加复杂和 耗时,通常需要专业设备和人员进行长时间的故障 检查和海上施工作业,而大范围的停电和停产也会 导致严重的经济损失。因此,对海缆进行监测和故 障定位研究,及时发现海缆故障,对海上风电场的安 全运行具有重要意义。

根据测距原理,海缆故障测距算法可分为阻抗 法、注入法和行波法等^[10-11]。阻抗法主要用于故障 定位,通过测量故障发生时的回路阻抗与线路单位 阻抗之间的比例计算故障距离。阻抗法测距原理相 对简单,但其有效性受到诸多因素影响,如配电线路 的传输均匀性、系统运行方式和过渡电阻等,定位效 率较低[12]。此外,阻抗法受线路参数和测量精度的 影响,用于混合线路测距时误差较大^[13-14]。注入法 通过向线路注入信号,并采用专门的信号检测装置 沿线路检测,查找故障位置。注入法不受消弧线圈 的影响,操作简便,但仍然需要人工巡线,定位效率 较低[15]。行波法利用故障发生时产生的行波信号 的传输时间差进行故障定位,定位精度较高且实用 性较强。然而,该方法面临行波波头检测难、定位装 置采样速率低、对时精度差等挑战,现代数字技术的 发展为行波法的应用提供了强大的技术支持^[16]。 柴鹏等[17]使用双端行波法结合本地时钟同步方式 定位电缆短路故障,可降低对双端同步的依赖。林 洪等^[18]利用高频传感器对行波波头进行采样,提升 了双端行波法的精度。王乐等^[19]通过小波变换分 · 38 ·

析故障行波电流,提高了线路故障定位的精度。

本工作基于 SIMULINK 仿真进行海缆故障定 位研究,设置多种故障类型及位置,并在相关实际数 据不充足的情况下,通过数值仿真验证定位方法。

1 海缆故障分析

根据故障性质可将海缆故障分为低阻故障和高 阻故障,对于光电复合型海缆,还可能出现光纤故 障。其中,低阻故障又称为短路故障,通常由海缆绝 缘层失效引起,是常见的海缆故障类型。对于三相 交流海缆,其短路故障可能表现为单相、两相、三相 接地短路故障或相间短路故障。

引发海缆损伤的原因主要有机械外力、海流运 动和海水腐蚀等。海缆通常铺设在浅海区域,容易 受外界和人为因素的影响产生损伤,如打桩施工、移 动式作业平台的插桩与起桩等操作。海缆受损部位 长时间浸泡在海水中,绝缘性能下降,易引起停电事 故^[20]。此外,随着海洋活动的增加,进入海上风电 场的船只抛锚及起锚、渔业活动中使用的渔网及铁 链等捕捞装备都可能会砸伤、拖拽海缆,导致海缆产 生不同程度的变形甚至破损[21]。海流运动也会引 起海缆损伤,除了受海流直接作用外,海缆还可能因 海流冲击产生涡激振动,进而出现疲劳损伤。此外, 在海流长期冲刷作用下,海缆附近的海床会形成较 大的局部冲刷坑,使海缆悬空,影响海缆的安全性。 海水中存在多种腐蚀因素,如盐分、溶解氧、海洋生 物等,海缆材料容易被腐蚀和损害。金属铠装层长 期浸泡在海水中,容易被腐蚀,护层被破坏后,铠装 层中的电流会导致电化学腐蚀,最终导致海缆损伤 故障^[22-23]。

2 海缆故障行波定位法

行波定位法主要分为单端行波定位和双端行波 定位。单端行波定位是通过计算首个行波到达测量 端的时间与反射波到达时间的差值,计算故障距 离^[24]。双端行波定位是通过首个故障行波到达两 端的时间差进行故障定位^[25]。线路结构复杂时,单 端行波法的定位结果可信度降低,但操作简单,成本 较低;双端行波定位仅利用波头初次到达时间,无需 发射波的波头到达时间,方法准确度和可信度更 高^[26]。综合两种行波测距的优点,以双端行波测距 为主、单端行波测距为辅,实现精确的故障定位。

2.1 单端行波定位

单端行波定位根据故障行波两次到达测量端的 时间差来计算故障点与测量端之间的距离,测距示





假设海缆线路在 F 点发生故障,初始故障行波 到达测量端 1 的时间记为 t_1 ,故障行波回到故障点 F 被反射再次到达测量端 1 的时间记为 t_2 ,海缆线 路的总长为 D,行波的传播速率设为 v,则利用单端 行波法计算故障点距离($L_{\rm E}$)的公式为

$$L_{\rm F} = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \tag{1}$$

2.2 双端行波定位

双端行波定位根据故障行波首次到达线路两个 测量端的时间差进行计算,测距示意图见图 2。



图 2 双端行波定位测距示意图

假设海缆线路在 F 点发生故障,故障行波到达测量端 1 的时间记为 t_3 ,到达测量端 2 的时间记为 t_4 ,海缆线路的总长为 D,行波的传播速率设为 v,则利用双端行波法计算故障点距离(L_F)的公式为



$L_{\rm F} = \frac{D - v(t_4 - t_3)}{2} \tag{2}$

3 海上风电用海缆行波法故障定位仿真

3.1 仿真系统设计

基于 SIMULINK 仿真平台,搭建模拟海缆运行 的三相交流电路模型,可设置海缆电路故障类型及 故障点位置,并仿真电压、电流的波形。从波形中提 取故障行波,结合定位算法可计算出故障点的位置。 对比预设故障点位置,计算可知行波法故障定位的 准度。

海缆故障定位仿真电路模型见图 3,电路中包 括三相交流电源模块、测量模块、故障设置模块、负 载模块和多个输出模块。三相交流电源模块设置相 间电压为 110 kV,频率为 50 Hz;测量模块用于测量 电压和电流,电路由两段组成,总长为 200 km,电阻 为 0.012 73 Ω·km⁻¹,电感为 0.933 7×10⁻³ H·km⁻¹, 电容为 12.74×10⁻⁹ F·km⁻¹;故障设置模块用于设置 电路的故障类型,如单相接地、双相短路等,位于两 段电路中间,可通过设置两段电路的长度实现对故 障点位置的调整;负载模块代表电路中的负载;输出 模块用于输出数据。仿真设置的采样时间为 1× 10⁻⁷ s,仿真时长为 0.06 s,故障发生时刻为 0.02 s。

海缆常见故障类型包括单相接地短路故障、相间短路故障、两相接地短路故障、三相接地短路故障 等,而实际工程中的电路故障存在多种类型。本工 作以两相短路接地为例,在距离电源位置 50,75, 100,125,150,175 km 处设置多个故障点,分别进行

图 3 海缆故障定位仿真电路模型

故障仿真;利用行波法计算故障点位置,并与预设数 值进行对比。

3.2 行波提取算法

分析故障前一段时间和故障后一段时段内的三 相电压、电流之间的差,计算暂态三相电压(u)和暂 态电流(i),然后进行克拉克模量变换。电压模量 (u_m) 和电流模量 (i_m) 的计算公式为^[27]

$$i_{\rm m} = Q \times i \tag{3}$$

$$u_{\rm m} = Q \times u \tag{4}$$

$$Q = \begin{vmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$
(5)

2024 年第 4 期	电线电缆
No. 4 2024	Wire & Cable

式中:Q为克拉克变换矩阵。

电压 1 模正向行波 (u_{r1}) 和反向行波 $(u_{r1})^{[28]}$ 的计算公式为

$$u_{\rm f1} = \frac{1}{2} (u_{\rm m1} + i_{\rm m1} \times \sqrt{\frac{L}{C}})$$
 (6)

$$u_{r1} = \frac{1}{2} (u_{m1} - i_{m1} \times \sqrt{\frac{L}{C}})$$
 (7)

式中:*u*_{m1}、*i*_{m1}分别表示 *u*_m和 *i*_m的1模分量;*L*、*C* 分别为每千米输电线路的正序电感和正序电容。

将行波提取后,判断出波头到达时间,利用公式 (1)和公式(2)计算故障点位置。

4 仿真结果与讨论

故障点位置为 50 km 时,电路首端和尾端三相 电压与电流的仿真图见图 4、图 5。首端和尾端分 别代表图 2 中的测量端 1 和测量端 2;首端电压和 尾端电压分别代表在电路的首端和尾端测得的电 压;首端电流和尾端电流分别代表在电路的首端和 尾端测得的电流。



尾端三相电压与电流的仿真图

由图 4、图 5 可知,在 0.02 s 时,发生人为设置 的两相短路接地故障,首、尾端的电压和电流均在该 时刻开始发生剧烈变化。首端电压的三相均产生剧 烈振荡,但整体幅度变化较小,首端电流中的两相发 生较大波动,一相仍保持在 0 附近;尾端电压、电流 同样产生振荡,但振荡形式与首端不同。

从电路首端和尾端电压中提取首端和尾端的故障行波数据,分别见图 6 和图 7。



图 6 故障点位置为 50 km 时的首端电压行波



图 7 故障点位置为 50 km 时的尾端电压行波

由图 6 可知,首端电压行波中,正向行波与反向 行波的整体分布近似关于 x 轴对称,且波头分布较 密,与故障点位置为 50 km 时距离首端较近的设置 一致。由图 7 可知,尾端电压行波中,正反两个行波 接近重合,与首端波形有明显差异,且波头分布较 疏,与故障点位置距离尾端较远导致行波传输时间 较长的设置一致。行波发生突变处代表一个波头, 读取波头间的时间差,可计算出故障点与首端的距 离,确定故障点位置。仿真和定位结果见表 1。

由表1可知,单端行波法和双端行波法均能够 较为准确地计算出故障点的位置。但是,双端行波 法具有更高的准确度,特别是在故障点距离首端较 远时,可以更加精确地实现对故障点的定位。

故障点位置/	故障点位置/ 定位位置/km		相对误差/(×10 ⁻⁵)		
km	单端行波法	双端行波法	单端行波法	双端行波法	
50	50.015 0	49.9994	30.100 0	-1.105 5	
75	75.037 1	74.992 5	49.429 0	-10.033 0	
100	100.001 1	100.000 0	1.105 5	0.000 0	
125	125.037 6	125.007 5	30.100 0	6.0199	
150	150.016 2	150.000 6	10.770 0	0.368 5	
175	175.038 2	174.9936	21.816 0	-3.668 3	

表1 仿真和定位结果

5 结束语

海缆故障的原因主要包括机械外力、海流运动、 海水腐蚀等,易导致单相接地短路故障、相间短路故 障、两相接地短路故障、三相接地短路故障等故障。 本工作利用 SIMULINK 对海缆的三相交流电路进 行故障仿真,获取海缆从正常运行至发生故障及之 后的电压、电流数据,然后从仿真数据中提取故障暂 态行波,并利用行波法计算海缆的故障位置。基于 仿真数据,单端行波法及双端行波法均能够较好地 计算出故障点的位置,但双端行波法均能够较好地 计算出故障点的位置,但双端行波法具有更高的精 度。基于此,未来可对更加复杂的海上风电场的海 缆电路结构进行仿真,并在双端行波法的基础上开 发适宜的定位模型。

参考文献:

- [1] 何建东,邱情芳,冯成.大规模海上风电集成送出关键技术
 与发展趋势综述[J].风能,2022(12):82-87.
- [2] 孙丽平,易晓亮,宋子恒.我国海上风电发展面临的挑战和 相关建议[J]. 中外能源, 2022,27(11): 30-35.
- [3] 焦永飞,孟金,潘良伟,等.海上风电场 35 kV 海底电缆敷
 设施工技术[J].水电与新能源,2022,36(5):44-47.
- [4] 钟才惠.海上风电接入对电网电能质量的影响分析[J].科 技资讯,2021,19(32):38-41.
- [5] 杨林刚,徐志辉,王霄鹤,等.柔性直流送出的海上风电场 谐波谐振问题分析[J].广东电力,2020,33(7):1-10.
- [6] 李思佳. 阳江海上风电 220 kV 海缆施工技术研究[J]. 电子 测试, 2019(20): 70-72.
- [7] 孙毅龙,许成顺,席仁强,等.长期水平荷载对单桩式海上风机结构自振频率的影响分析[J].振动与冲击,2023,42
 (2):108-115.
- [8] 范夏玲.海上风电项目钢管桩防腐蚀设计研究[J].电力勘 测设计,2021(增刊2):50-54.
- [9] 任伟,陈有登,谢志猛,等.海上风电防腐蚀研究现状与前景[J].应用能源技术,2022(2):49-52.
- [10] 吕枫,周怀阳.缆系海底科学观测网研究进展[J]. 工程研

究-跨学科视野中的工程, 2016,8(2): 139-154.

- LU F, ZHOU H, PENG X, et al. Technical preparation and prototype development for long-term cabled seafloor observatories in Chinese marginal seas [M]//FAVALI P, BERANZOLI L, De SANTIS A, et al. Seafloor Observatories: A New Vision of the Earth from the Abyss. Berlin: Springer, 2015: 503-529.
- [12] 李蓉,周凯,饶显杰,等.基于输入阻抗谱的电缆故障类型
 识别及定位[J].高电压技术,2021,47(9):3236-3245.
- LIU C, SCHNEIDER K, KIRKHAM H, et al. State estimation for the NEPTUNE power system [C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas: IEEE, 2003: 748-754.
- YOKOBIKI T, IWASE R, TAKAHASHI Y, et al. Underwater repair method for shunt fault on submarine cable [C]//2013
 IEEE International Underwater Technology Symposium. Tokyo: IEEE, 2013: 1-4.
- [15] 王东芳,陶飞达,黄智鹏,等. 配电网小电流接地方式下故 障定位技术研究综述[J]. 机电工程技术,2020,49(1):65-68.
- [16] 郭舒毓. 基于行波原理的配电网高精度故障定位技术研究及 应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [17] 柴鹏,周灏,张煜,等.基于双端行波法的电缆线路短路故障定位改进[J].中国电力,2020,53(11):168-174.
- [18] 林洪, 王寒, 张康伟, 等. 基于改进双端行波法的配电网故 障定位方法研究[J]. 电工技术, 2023(5): 88-90.
- [19] 王乐, 杜凤瑾. 基于小波变换的改进双端行波法故障定位研究[J]. 电工技术, 2022(3): 34-37.
- [20] 郑春生. 埕岛油田海底电缆故障原因与分布规律[J]. 电气应用, 2017,36(10): 28-32.
- [21] 郑新龙,李世强,敬强,等.海底电力电缆的损伤分析与防护[J].电气技术,2013(12):86-88.
- [22] 吴聪,颜才升,郭强,等. 琼州海峡 500 kV 海底电缆海底腐 蚀环境研究[J]. 中国设备工程, 2017(8): 133-135.
- [23] 鲍敏铎. 舟山直流输电海缆铠装电腐蚀故障分析[J]. 浙江
 电力, 1997(3): 1-4.
- [24] 范新桥.基于多点电流测量的输电线路故障定位方法研究[D].北京:华北电力大学, 2012.
- [25] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.基于分布参数模型的直流 输电线路故障测距方法[J].中国电机工程学报,2010,30 (13):75-80.
- [26] 张光益,张鹏宇,方曦.高压输电线路故障定位综述[J].科 技风,2023(3):86-89.
- [27] 马永明,陈平,刘万超,等.基于 MATLAB 的输电线路故障 行波仿真平台[J].山东理工大学学报(自然科学版),2010, 24(3):78-81.
- [28] 马永明,陈平,刘万超,等.基于 MATLAB 的输电线路故障 行波仿真平台[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专 业第二十四届学术年会论文集(下册).北京:北京中国农业 大学,2008:2333-2337.