海上风电场集电线路两相短路故障的在线故障测距方法

尹 飞[1]，沈志中[1]，余从权[1]，成月良[2]，董 雪[2]，张柯柯[3]，晁晨翔[4]，张 峰[4]
(1.国家电投集团 江苏电力有限公司，江苏 南京 210003；2.国电南瑞南京控制系统有限公司，江苏 南京 210061；3.南京南瑞工业控制技术有限公司，江苏 南京 210031；4.上海交通大学 电气工程学院，上海 200240)

摘 要：由于换流器存在输出电流幅值受限、相位受控以及缺少零序电流的现象，当海上风电场集电线路发生两相短路故障时，故障测距不准确。文章分析了海上风电场集电线路两相短路时的复合序网，使用故障期间柔性直流换流器和风电机组换流器抑制负序电流的特性，通过测量装置安装处的负序电压在线计算故障点的正序电压，构建了关于故障距离方程，最终求解出故障距离，完成在线故障测距。所提在线故障测距方法在较大过渡电阻、非阻性过渡电阻情况下依然能够可靠工作，不受海上风电场无功支撑策略影响，有利于提升海上风电场安全稳定运行能力。

关键词：换流器；海上风电场；两相短路；故障测距；过渡电阻
中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1647-08

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，海上风电受到广泛关注[1-3]。由于海上风电场运行环境复杂、恶劣，人为和自然因素可能引起海底电缆损坏，造成海上风电场集电线路发生短路故障，进而导致弃风窝电现象。因此，海上风电场集电线路故障位置地检测对于推动风力发电的发展，实现“双碳”目标具有重要意义。

目前，已有学者针对风电场集电线路中单相接地故障期间的故障测距、定位展开了研究。两相短路故障的故障测距方法主要分为基于行波检测、基于时域分析和基于数据驱动的故障测距方法。文献[4]在现有测量点基础上，增设最小数量的测量装置，提出了一种按照多端系统故障录波信息定位故障分支并完成故障测距的算法，虽然增加少量的成本，但消除了单端量测距算法的疑似故障点。文献[5]建立风电场内集电线路的等效电流注入模型和单区间测距模型，提出了一种基于分段阻抗匹配的风电场集电线路单相接地短路电缆故障测距方法。文献[6]借助深度学习挖掘稳态电流幅值、稳态电流相位、暂态电流值与故障距离呈明显的非线性关系，提出基于改进深度去噪自编码网络的故障测距方法，能够自适应混合短线路、集电线多分支，且受采样率、过渡电阻、故障相位角以及噪声影响小。文献[7]针对风机箱高压侧无零序电流回路，提出了一种基于连续查找故障段的单相接地电缆故障定位方法，并引入了描述故障点电弧接地的对数电弧模型，实现了高精度的故障定位。文献[8]基于接地变压器应用于大型风电场的特性，从理论上推导出了其故障区间判据，并提出一种基于风电场共性和行波的多分支输电线路故障定位方案。文献[9]提出一种适用于逆变型新能源场站交流送出线路的测距式距离保护，基于负序网络中负序开路的特征，利用保护安装处电气量计算故障点电压，进而求取故障距离，但该方法不适用于双端逆变型电源线路。文献[10]采用时域有限差分法离散以偏微分方程模式表现的传输线方程，再利用优化的变分迭代法求解传输线方程，构建故障测距函数以完成故障定位，该方法适用于风电场双回送出线路故障测距方法。基于行波传输特性，文献[11]构建了关于故障位置的传输方程，利用参数估计法从理论上对多个测点传输方程形成的超定方程进行求解，最终得到了故障位置，并提出了一种基于参数估计

收稿日期：2024-12-05。
基金项目：国家自然科学基金项目(52277112)。
通信作者：晁晨翔(1998-)，男，博士研究生，研究方向为含新能源电网保护与控制技术。E-mail：ccx405@sjtu.edu.cn

的风电场故障定位策略。文献[12]在非分支区域定义的基础上，充分考虑风机与风电场零序分量之间的特殊关系，分层实现了风机独立故障非分支区域识别和电缆故障定位。基于各终端测量装置的电量信息,文献[13]利用三相总不平衡度和综合矢量误差，构建了风电场短路故障实测值与理论计算值之间的矢量偏差目标函数，根据所得结果确定了实际故障信息与假设故障间隔信息的差异程度，提出了一种基于矢量偏差度的风电场输电线路故障间隔定位方法。基于行波检测的故障测距方法，利用行波的入射和反射特性实现故障测距[14,15]。基于时域分析的故障测距方法则是通过线路建立时域方程进行求解,实现故障测距[16,17]。基于数据驱动的故障测距方法,通过大量数据配合人工智能算法计算故障距离[18,19]。行波法和时域法要求测量装置具备高采样率，一般在10 kHz以上，数据驱动法则存在物理意义不明确、训练过程复杂等缺点。

为了克服上述方法的不足，本文分析了海上风电场集电线路两相短路时的复合序网，利用故障期间柔性直流换流器和风电机组换流器抑制负序电流的特性，通过测量装置安装处的负序电压在线计算故障点的正序电压，进而构建关于故障距离方程,求解出故障距离,完成在线故障测距。所提在线故障测距方法在较大过渡电阻情况下依然能够可靠工作，且不受海上风电场无功支撑策略影响，有利于提升海上风电场安全稳定运行能力,推动风力发电的发展。

1 实际工程

1.1 海上风电场拓扑

江苏某海上风电柔直并网工程如图1所示统。海上风电机组通过场内35 kV汇集系统接入220 kV海上升压变压器(风机侧变压器),海上风电场1,2和3通过220 kV集电线路依次接入柔直侧变压器和海上柔直换流站，海上风电场1,2和3的容量分别为400,400 MW和300 MW。

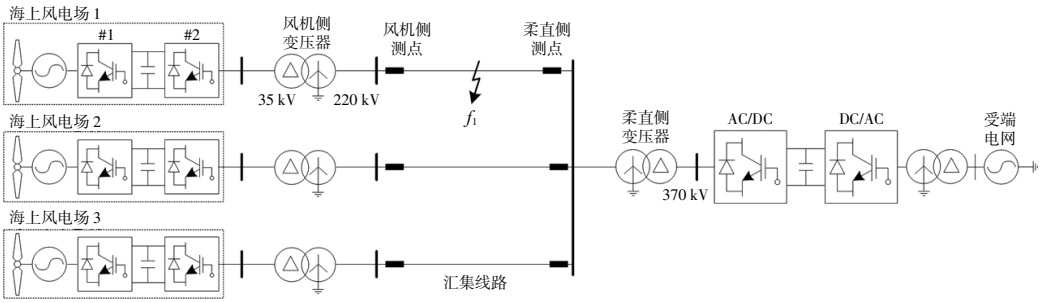


图1 海上风电经柔直送出系统

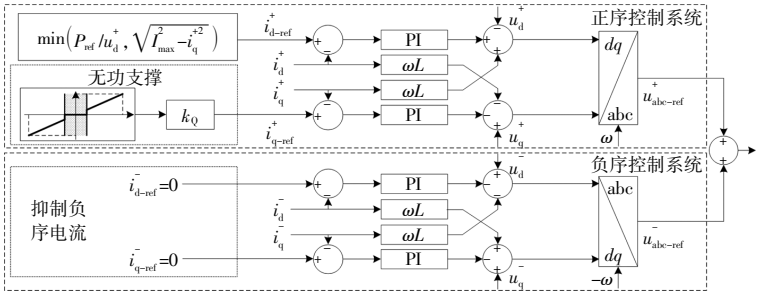
Fig.1 Topology of offshore wind power transmission system through flexible direct transmission

1.2 换流器控制策略

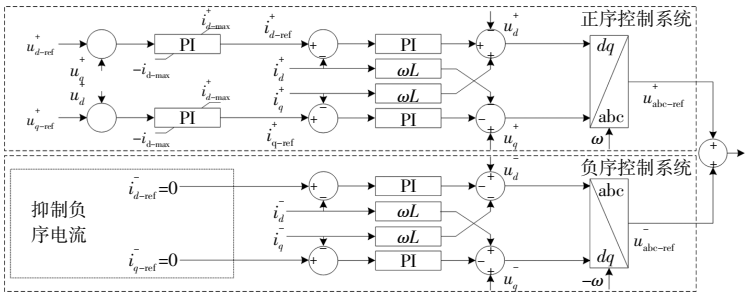
图1中:风电机组经过全功率换流器并网,为了构建稳定的交流侧电压幅值并向换流器#2输送功率,换流器#1通常采用有功功率-交流电压幅值控制策略;换流器#2通常采用直流电压-无功功率控制策略，以维持直流侧电压和单位功率因数[20,21]。

集电线路发生故障时，在正序网络中风机侧可等效为受控电流源，其输出电流的幅值和相位受故障条件、控制策略和无功支撑策略等因素影响[22]。换流器#2会将负序电流控制抑制为零,因此负序网络中风机侧可近似视为开路[9]。换流器#2和送端柔直控制如图2所示[23]。

图2中:P为有功功率;u为电压值;i为电流



(a)换流器#2



(b)送端柔直换流器

图 2　换流器控制框图

Fig.2 Control block diagram of converter

值;ω 为由锁相环计算得出的角频率；下标 d,q,ref,abc 和 max 分别代表 d 轴分量、q 轴分量、参考值、三相值和最大值;上标+,−分别代表正序分量和负序分量;k_Q 为无功支撑系数，不提供无功支撑时为 0,提供无功支撑时为 1。

海上风电场送端柔直换流器采用交流电压−频率的控制策略[23-25],在交流侧构建额定交流电压,保证风电机组的正常功率输出。在集电线路发生故障期间,柔直换流器提供的正序短路电流受 i^+_{d-max},i^+_{q-max},i^-_{d-max} 和 i^-_{q-max} 限制,因此柔直侧正序和负序电流幅值受限、相位受控。通过上述分析可见,集电线路发生两相短路故障期间,风机侧和柔直侧的正序、负序电流均表现出幅值受限、相位受控的特性,根据测量阻抗计算的故障测距性能下降。

2　在线故障测距方法

海上风电场的集电线路发生两相短路故障时，由正序网络和负序网络组成的复合序网如图 3 所示。

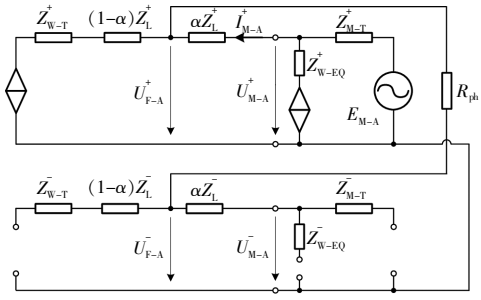


图 3　海上风电场集电线路复合序网

Fig.3 Composite sequence network of offshore wind farm convergence lines

图 3 中:α 为故障距离占集电线路总长度的比例;R_{ph} 为相间过渡电阻;Z_L 为集电线路阻抗;$Z_{Wind-EQ}$ 为其他集电线路等效阻抗;Z_{W-T} 为风机侧变压器阻抗;Z_{M-T} 为柔直侧变压器阻抗;E_{M-A} 为柔直换流器 A 相等效电压源;下标 W,M,F 和 A 分别代表风机侧、柔直侧、故障点和 A 相电气量。

根据基尔霍夫电压定律，柔直侧测量装置安装处的正序电压、电流和故障点正序电压关系为

$$\alpha=\frac{U^+_{M-A}-U^+_{F-A}}{Z^+_L\cdot I^+_{M-A}} \tag{1}$$

对于柔直侧测量装置，故障点处的电气量无法直接获取,因此式(1)中的 U^+_{F-A} 为未知电气量。由于在故障期间柔直换流器和风机换流器将抑制负序电流，因此在负序网络中风机侧和柔直侧均近似为开路。由此可得，负序网络中电流近似为 0,因此 U^-_{M-A},U^-_{F-A} 和 U^+_{F-A} 可相互等效,三者关系为

$$U^-_{M-A}=U^-_{F-A}=U^+_{F-A} \tag{2}$$

由式(2)可得故障距离计算式为

$$\alpha=\frac{U^+_{M-A}-U^-_{M-A}}{Z^+_L\cdot I^+_{M-A}} \tag{3}$$

式中:Z^+_L 可提前设置;U^+_{M-A},U^-_{M-A} 和 I^+_{M-A} 可以由柔直侧测量装置测得，实现了无需通信的在线故障测距。当风电场内部 35 kV 集电线路发生故障时,按照式(3)计算出的故障距离大于 100%,由此可判断为 220 kV 集电线路的外部故障。需要指出的是,此时的故障测距结果存在一定误差,只能作为故障定位的初步判断。

3　在线故障测距方法流程

柔直侧测量装置持续监测电压，若某一相的电压低于 0.9 p.u.,在线故障测距方法启动。随后进行故障类型的检测,如果是两相短路故障,则通过式(3)计算故障距离并输出故障距离,否则在线

故障测距方法返回。文献[24]提出利用序电压、相电压的幅值和相位识别故障类型，在含有逆变型电源场景下具有较好的效果，因此本文使用该方法识别故障类型，以保证在其他故障类型下所提方法可靠工作。此外,集电线路发生其他类型故障时，由于测量装置到故障点之间不存在如图 3 所示的明显通路，则此时所提在线故障测距方法计算出的故障距离将远大于实际值，可判断为无效值，因此集电线路发生其他类型故障时不会引起测距错误。本文所提在线故障测距方法的流程如图 4 所示。

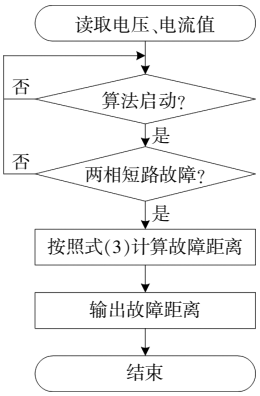


图 4　在线故障测距方法流程

Fig.4 Process of online fault location method

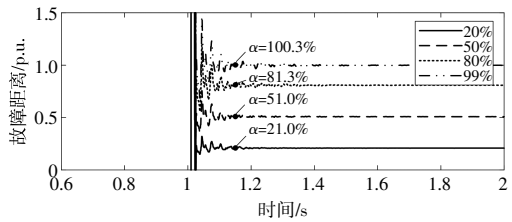
4　仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台,搭建图 1 所示测试系统仿真模型，验证所提在线故障测距方法。

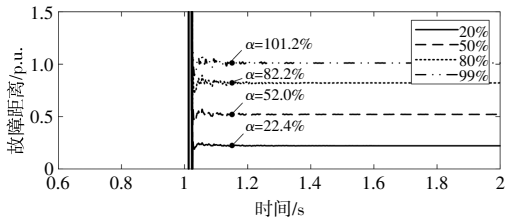
4.1　区内故障时测距结果

当集电线路的 20%,50%,80%和 99%处经 10,50 Ω 和 100 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时,所提在线故障测距方法测距结果如图 5 所示。

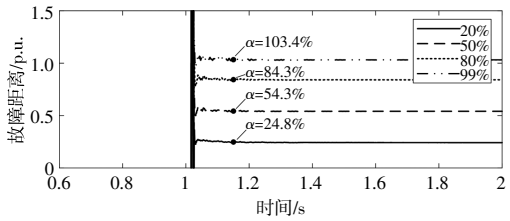
由图 5 可知,过渡电阻为 10 Ω 时,集电线路的 20%,50%,80%和 99%处故障后 150 ms 时,在线故障测距方法测距结果分别为 21.0%,51.0%,81.3%和 100.3%,绝对误差分别为 10.4,10.2,13.0 m 和 12.6 m。过渡电阻增大至 100 Ω 时,集电线路



(a)过渡电阻为 10 Ω



(b)过渡电阻为 50 Ω



(c)过渡电阻为 100 Ω

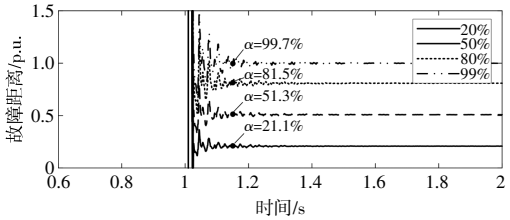
图 5　不同过渡电阻下所提方法测距结果

Fig.5 Distance measurement results of the proposed methods under different excessive resistances

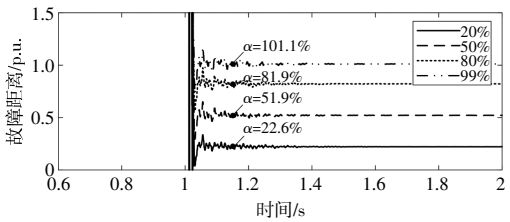
的20%,50%,80%和 99%处故障后 150 ms 时,在线故障测距方法测距结果分别为 24.8%,54.3%,84.3%和 103.4%,绝对误差分别为 47.9,43.0,43.3 m 和 43.8 m。所提在线故障测距方法能够准确计算故障距离，在存在过渡电阻的情况下依然能够正常工作,具有较强的抗过渡电阻能力。

本文测试所提在线故障测距方法对非阻性过渡电阻的耐受能力。当集电线路的 20%,50%,80%和 99%处经 10+j1 Ω,50+j5 Ω 和 100+j10 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时，所提在线故障测距方法测距结果如图 6 所示。

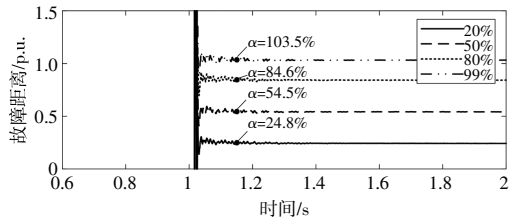
当集电线路的 20%,50%,80%和 99%处经 10−j1 Ω,50−j5 Ω 和 100−j10 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时,所提在线故障测距方法测距结果



(a)过渡电阻为 10+j1 Ω



(b)过渡电阻为 50+j5 Ω

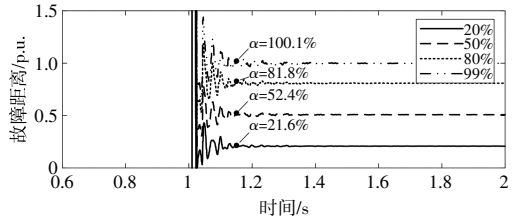


(c)过渡电阻为 100+j10 Ω

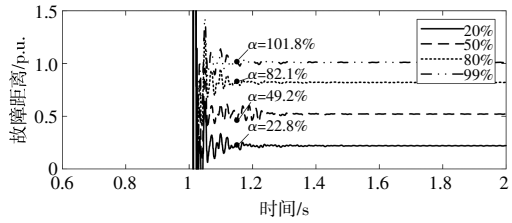
图 6　阻感性过渡电阻下所提方法测距结果

Fig.6 The proposed method based on resistance inductive transition resistance results in fault location

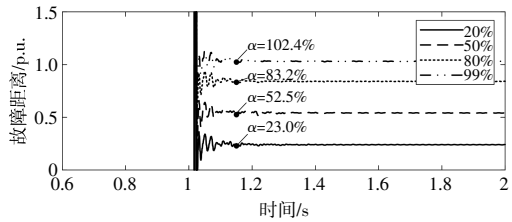
如图 7 所示。



(a)过渡电阻为 10–j1 Ω



(b)过渡电阻为 50–j5 Ω



(c)过渡电阻为 100–j10 Ω

图 7　阻容性过渡电阻下所提方法测距结果

Fig.7 The proposed method under resistive capacitive transition resistance results in fault location

由图 6,7 可知,当过渡电阻呈现阻感性或阻容性时,所提在线故障测距方法依然能够正确计算故障距离。这表明该方法对非阻性过渡电阻具有较强的耐受能力,因此在海底电缆复杂的故障环境下具备较好的适应性。

4.2　区外故障时测距结果

当 220 kV 集电线路经 10,50 Ω 和 100 Ω 过渡电阻发生区外两相短路故障时,所提在线故障测距方法测距结果如表 1 所示。

表 1　外部故障时所提方法测距结果

Table 1 Distance measurement results of the proposed method in case of external faults

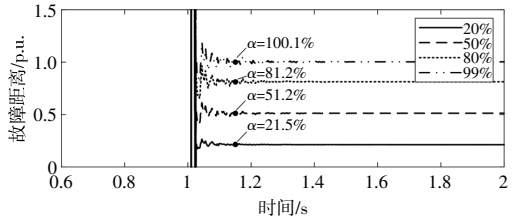
故障位置	过渡电阻/Ω	计算故障距离/%
风电场内部 35 kV 集电线路末端	10	1 451
	50	1 462
	100	1 487
柔直变压器 370 kV 侧	10	−514
	50	−538
	100	−591

由表 1 可知,220 kV 集电线路区外发生两相短路故障时，所提在线故障测距方法计算出的故障距离大于 100%，由此可判断为 220 kV 集电线路的外部故障。但测量点与故障点之间的变压器阻抗远大于 220 kV 集电线路阻抗,导致此时故障测距结果存在误差。因此该结果只能作为故障定位的初步判断,如果需要进行故障线路的维修,须要进一步借助其他元件保护的故障定位信息。

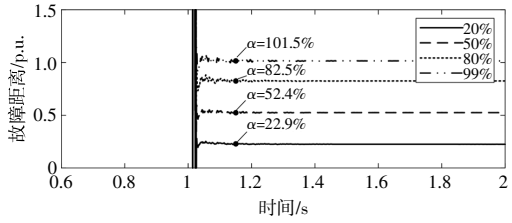
4.3　无功支撑策略对测距结果的影响

现代电网导则通常要求故障期间逆变器提供无功支撑。当风机换流器提供无功支撑,集电线路的 20%,50%,80%和 99%处经 10,50 Ω 和 100 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时，所提在线故障测距方法测距结果如图 8 所示。

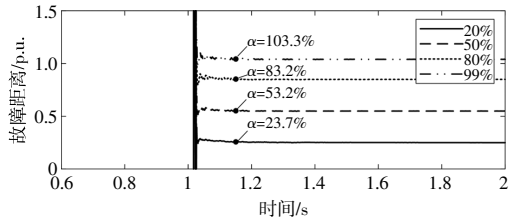
由图 8 可知,过渡电阻为 10 Ω 时,集电线路的 20%,50%,80%和 99%处发生故障 150 ms 后,在线故障测距结果分别为 21.5%,51.2%,81.2%和 100.1%，绝对误差分别为 15.2,12.1,12.0 m 和 10.6 m。过渡电阻增大至 100 Ω 时,集电线路的



(a)过渡电阻为 10 Ω



(b)过渡电阻为 50 Ω



(c)过渡电阻为 100 Ω

图 8 不同无功支撑策略下所提方法测距结果

Fig.8 Distance measurement results of the proposed methods under different reactive power support strategies

20%,50%,80%和 99%处故障后 150 ms 时，在线故障测距方法测距结果分别为 23.7%,53.2%,83.2%和 103.3%，绝对误差分别为 37.2,32.0,32.3 m 和 43.4 m。由于对故障距离的计算过程不涉及风机侧正序电流，因此所提在线故障测距方法能够适应不同的无功支撑策略,具有较强的自适应性。

4.4 方法对比

传统距离保护的故障距离计算是通过测量阻抗的虚部除以集电线路单位电抗得出。本文将传统距离保护测距方法、文献[10]、文献[11]所提基于参数估计的风电场混合输电线路故障定位方法与本文所提在线故障测距方法进行对比。当集电线路的 50%处经 10 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时,4 种测距方法计算结果如表 2 所示。

表 2 本文所提方法与现有方法对比

Table 2 Comparison between the proposed method and existing methods

方法	采样频率/kHz	测距结果/%
传统距离保护测距	1.2	-36.9
文献[10]所提方法	10	48.8
文献[11]所提方法	10~100	50.6
本文所提在线故障测距方法	1.2	50.4

由表 2 可知，当集电线路的 50%处经 10 Ω 过渡电阻发生两相短路故障时，传统距离保护测距受附加阻抗影响而无法正确计算故障距离。文献[10]所提方法利用线路阻抗、电压和电流组成的时域方程,在这种场景下,时域方程依然能够正确计算故障距离。文献[11]所提基于参数估计的风电场混合输电线路故障定位方法和本文所提在线故障测距方法也能够正确计算故障距离。但文献[10],[11]所提方法需要 10 k~100 kHz 的高采样率,这要求电力系统升级测量装置。而本文所提在线故障测距方法采样频率为常规的 1.2 kHz,在该采样频率下依然能够实现准确的故障测距，本文所提方法更具备实用性。

5 结束语

本文分析了风电场集电线路两相短路时的复合序网，利用故障期间柔性直流换流器和风电机组换流器抑制负序电流的特性，通过测量装置安装处的负序电压计算故障点处的正序电压，构建了关于故障距离方程,最终求解出故障距离,完成了准确、迅速且无需通信的在线故障测距。所提在线故障测距方法在存在过渡电阻情况下，依然能够正常工作,并且能够耐受非阻性的过渡电阻,具有较强的抗过渡电阻能力。所提在线故障测距方法不受无功支撑策略影响，且在常规采样频率下依然能够实现准确的故障测距，具有较强的适用性和推广性。

参考文献：

[1] 谢永胜,周专,魏春霞,等.电力系统中风力发电的需求响应和灵活性提高研究 [J]. 可再生能源,2023,41(2):277-284.

[2] 许益恩,张新松,李大祥,等.基于改进下垂控制的双馈风电机组频率控制策略 [J]. 可再生能源,2023,41(1):107-113.

[3] 晁晨栩,郑晓冬,高飘,等.含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护 [J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):6968-6979.

[4] 李永丽,辛双乔,李涛,等.基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法 [J]. 电力工程技术,2022,41(5):2-11.

[5] 翟羽佳,张凯,朱永利,等.基于分段阻抗匹配的风电场集电线路单相接地故障测距方法 [J]. 智慧电力,2020,48(12):26-32.

[6] 朱永利,刘富州,张翼,等.基于改进 DDAE 的风电场集电线单相接地故障测距 [J]. 电测与仪表,2024,51(5):166-174.

[7] 王宾,任萱.中性点经小电阻接地风电场集电线路单相接地故障测距研究[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2136-2144.

[8] 张科,朱永利,郑艳艳,等.风电场输电线路单相接地故障定位研究[J].太阳能学报,2020,41(5):114-120.

[9] 晁晨栩,郑晓冬,高飘,等.针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6681-6693.

[10] 束洪春,邓亚琪,曹璞璘,等.风电场双回送出线路时

域故障测距新方法[J].电网技术,2023,47(4):1450-1460.
[11] 张科,马长啸,曹雁庆,等.基于参数估计的风电场混合输电线路故障定位方法 [J]. 太阳能学报,2020,41(8):323-329.
[12] 朱永利,丁嘉,潘新朋.基于零序分量的风电场集电线不对称接地故障定位[J].电力系统保护与控制,2023,51(3):56-67.
[13] 张科,孙立志,朱永利,等.基于矢量偏离度的风电场集电线路故障定位方法[J].电力系统自动化,2019,43(10):127-133.
[14] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4399-4409,4640.
[15] 胡瑾,吕干云,叶加星,等.基于卡尔曼滤波状态估计的输电线路故障测距 [J]. 电气自动化,2023,45(4):85-87,90.
[16] 林佳圆,陈睿,李依琳,等.基于参数辨识的配电网故障测距方法[J].南方电网技术,2019,13(4):80-87.
[17] 张广斌,陈柏宇,束洪春,等.基于时域波形特征认知的输电线路近端故障辨识与定位[J].电力系统自动化,2024,48(5):146-156.
[18] 刘胤良,喻磊,林心昊,等.考虑配电线路参数误差的相间故障测距方法 [J]. 南方电网技术,2024,18(4):141-151.
[19] 和敬涵,罗国敏,程梦晓,等.新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5506-5516.
[20] 王玉坤,张慕婕,石梦璇,等.考虑风电频率响应的电力系统低频减载控制策略研究[J].可再生能源,2023,41(9):1247-1254.
[21] 尹子康,林忠伟,吕广华,等.基于数据驱动的风电机组变桨系统故障诊断与健康状态预测研究[J].东北电力大学学报,2023,43(5):1-11,17.
[22] Zheng X,Chao C,Weng Y,et al.High-Frequency fault analysis based pilot protection scheme for a distribution network with high photovoltaic penetration [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2023,14(1):302-314.
[23] Hooshyar A,El-Saadany E F,Sanaye-Pasand M.Fault type classification in microgrids including photovoltaic DGs [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(5):2218-2229.
[24] 王中行,周元贵,张学广.基于人工智能算法的风电机组状态监测和故障诊断技术研究综述[J].东北电力大学学报,2024,44(1):42-51.
[25] 王进钊,严干贵,刘侃.基于交替方向隐式平衡截断法的直驱风电场次同步振荡分析的模型降阶研究[J].发电技术,2023,44(6):850-858.

Online fault-location method for two-phase short-circuit faults in offshore wind farm collector lines

Yin Fei[1], Shen Zhizhong[1], Yu Congji[1], Cheng Yueliang[2], Dong Xue[2], Zhang Keke[1], Chao Chenxu[3], Zhang Feng[3]

(1.Spic Jangsu Electric Power Co.,Ltd., Nanjing 210003, China; 2.NARI-TECH Control Systems Co.,Ltd., Nanjing 210061, China; 3.Nanjing Nari Industrial Control Technology Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 4.School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to the current-magnitude limit, controlled phase angle, and absence of zero-sequence current of converters, fault-location errors occur when two-phase short-circuit faults happen in offshore wind-farm collector cables. This paper analyzes the composite-sequence network under such faults and exploits the capability of both the VSC-HVDC link and the wind-turbine converters to suppress negative-sequence current during the fault. By using the locally measured negative-sequence voltage, the positive-sequence voltage at the fault point is computed on-line, a fault-distance equation is established, and the fault position is solved in real time. The proposed on-line algorithm remains accurate for large and non-resistive fault resistances and is immune to the reactive-power support strategy of the offshore wind farm, thus enhancing the safe and stable operation of offshore wind power systems.

Keywords: converter; offshore wind farm; two-phase short circuit; fault location; transition resistance