

[海上风电]

新型海上风电场送出电缆的故障检测和定位方案

文/陈焕栩 丁志远 傅琪雯 郭洋 丁杰 李忠华
国网江苏省电力有限公司常州供电分公司

提出一种基于多频带信息的海上风电场送出线电缆的故障检测和定位方案，基于实时的电压变换率和电流极性来实现故障检测；再基于多频带故障信号求解故障距离，最后求得融合测距结果；通过挖掘多频带信息，保障算法在线路全长的测距准确度，有较好的工程实用性。

“双碳”背景下，可再生能源发电场站高比例并网已成为新型电力系统的不可逆趋势。风能作为可再生能源的重要代表之一，对于构建新型电力系统具有关键支撑作用。海上风电场一般建设于近海地区，依赖于海缆与大陆电网形成电气连接。海底电缆的绝缘层易被破坏，从而形成海缆故障。本文提出一种新型海上风电场送出线故障检测和定位方案。基于本地测量的电压和电流数据，提取电压和电流的低频和低频分量，再利用微分方程求解低频、高频的计算故障距离，最后将多个频带的故障位置特征信息进行融合得到一个测距结果，仿真结果表明，算法测距效果良好。

故障检测

1. 发展现状

国内外对于电缆故障诊断方法主要包括暂态信号特征提取和分类处理两个过程，基于输入阻抗谱实现电缆故障诊断，根据电力电缆分布参数模型、输入阻抗谱和频谱分析，通过对不同类型的电缆故障建模，获取正常和故障状态下电缆的输入阻抗谱特征进行故障类型的判别。神经网络和小波变换在故障诊断和分类领域有良好的应用前景，有专家构建深度神经网络DNN模型来进行电缆故障判别。上

述方法虽然使用了先进的信息处理算法，保证了故障判别的准确性，但算法过于复杂。当应用于海洋环境中时，其可靠性和快速性难以保证。

现有电缆线路故障定位方法致力于提升定位精度，然而海底环境特殊，需要用到专用的激光发射装备。不增设额外的专用设备，仅利用本地测量的电气量，根据暂态电气量的特征设计海缆故障检测和定位方案是亟待解决的问题之一。

2. 基于暂态电气量的检测方法

海上风电场送出系统结构图如图1所示，W代表海上风电场，T为海上升压变压器，L为送出海缆，BUS为并网站所高压母线，B为靠近母线BUS的故障检测和测距装置。

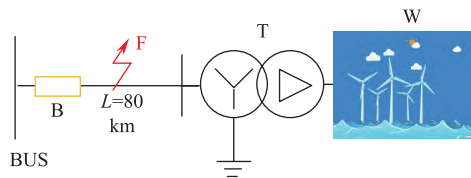


图1 海上风电场送出系统示意图

由于海底电缆被海水所环绕，海水属于良导体，电阻率低。海缆的绝缘层一旦破损，海缆的导电纤芯发生低过渡电阻的接地故障，线路的电压将出现大幅度跌落。

因此，可根据上述特征进行故障检测。当L上发生故障时，装置B处可感受到明显的电压跌落，电压变化率 dU 采用差分的方法来表示

$$dU = \Delta U / \Delta t \quad (1)$$

启动判据为

$$dU > U_{\text{set}} \quad (2)$$

式中， ΔU 为电压变化值； Δt 为时间间隔。

判据(1)在连续3个采样点成立时，判断线路有故障发生；同时还要基于检测到的电流极性判断故障方向，排除背侧故障。当判断发生正向故障后，取第1个点为故障发生时刻。

暂态电气信号分解及能量化

1. 信号分解法

基于采样的电压和电流暂态信号，利用基于LMD分解法，生成电压和电流的多频带数据。

1) 找出原始信号中每个半波振动所有的局部极值点，求出所有相邻的局部极值点的平均值和幅度包络估计值，求解公式为

$$\begin{cases} m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \\ a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中， n_i 、 n_{i+1} 为相邻的局部极值点； a_i 为幅度包络估计值。

然后将局部均值分解函数与原始信号分离，得到新的信号函数 $h_{11}(t)$ 和调频信号 $s_{11}(t)$ ，分别为

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \\ s_{11} = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \end{cases} \quad (4)$$

再判断 $s_{11}(t)$ 是否是纯频率调制信号，若是，则结束；反之，则需要重复迭代。

接着，计算幅度包络信号 $a_1(t)$ ，求出乘积函数分量 $PF_1(t)$ ，公式为

$$\begin{cases} a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t) \cdots a_{1n}(t) = \prod_{k=1}^n a_{1k}(t) \\ PF_1 = a_1(t)s_{1n}(t) \end{cases} \quad (5)$$

在原始信号分离出第一个PF分量之后，残留信号继续分解，直到获得所有的PF分量。

2. 信号能量化

获得所有PF分量后，原始的暂态信号按照频率完成分解形成多个频带。再将各PF分量进行能量化

$$E_i = (PF_i)^2 \quad (6)$$

式中， E_i 为频带 i 的能量值； PF_i 为频带 i 对应的LMD分解系数。

故障信号沿输电线路传递时，高频信号相比于低频信号衰减更快，因此可以根据高频频带能量的占比来区分故障区段。计算高频频带能量占比为

$$\overline{E}_i = \frac{E_i}{\sum_{m=0, \dots, H} E_m} \quad (7)$$

式中， $\overline{E}_i$ 为频带能量占比； $\sum_{m=0, \dots, H} E_m$ 为所有频带的能量值之和。

当高频能量的占比越小时，故障区段离装置B的位置越远。

故障定位

1. 发展现状

目前对海底电缆的故障进行精确定位，需要用到专用的仪器或者额外铺设光缆。不管哪种方法，其硬件的投资都比较高，并且测距精度受硬件的性能影响，可能并不适用于海底环境。

2. 基于暂态电气量的故障定位方法

R-L模型法是用于计算线路阻抗，对于具有分布参数的输电线路，在短路时保护装置所感受到的阻抗为

$$Z(f) = Z_{c1} \text{th}(\gamma d) \quad (8)$$

式中， Z_{c1} 为输电线的正序波阻抗； γ 为每千米的正序传输参数； d 为短路点到保护安装处的距离。

考虑到 $\bar{a}$ 可视为固定值，则当 d 较小时， $Z(f)$ 可简化为

$$Z(f) \approx R_1 + j\omega L_1 \quad (9)$$

式中， R_1 和 L_1 分别为线路等效电阻和电感。

海上风电场经过高压交流送出的输电线路一般不会超过80 km，属于短输电线路，可用R-L模型法进行近似等效，再列微分方程求解故障距离

$$u(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} \quad (10)$$

由于 $R_1 + j\omega L_1 = (r_1 + j\omega l_1)l_f$ ，求解出 l_f 后即可得到故障到装置B的距离。

考虑到分布电容的存在，在同一故障位置下，不同频带的电压和电流分量会得出多个 l_f 结果。为了融合多个 l_f 的结果，减少总体误差，可设计融合计算为

$$L_f = D_1 l_{f1} + D_2 \cdot l_{f2} + D_3 l_{f3} \quad (11)$$

式中， l_{f1} 、 l_{f2} 和 l_{f3} 分别为3个特征频带的故障距离； D_1 、 D_2 和 D_3 分别为它们的权重； l_f 为最终的测距结果。

D_1 、 D_2 和 D_3 取值可采取差异化整定，根据式（6），当故障区段较近时，可以将高频的权重略微取大，当故障区段较远时，应减少高频的权重，具体设定可根据实际的工程场景进行调整。

仿真验证

在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的风电场送出线路系统模型，每个风电场均含有20台双馈风机，测量装置的采样频率设置为10 kHz，数据窗长度为20 ms。

在线路L的典型位置，距离首端为40 km的线路中点处设置A相金属性接地故障，截取故障前后20 ms时间窗长内装置B处采样的电压和电流信号，如图2所示。

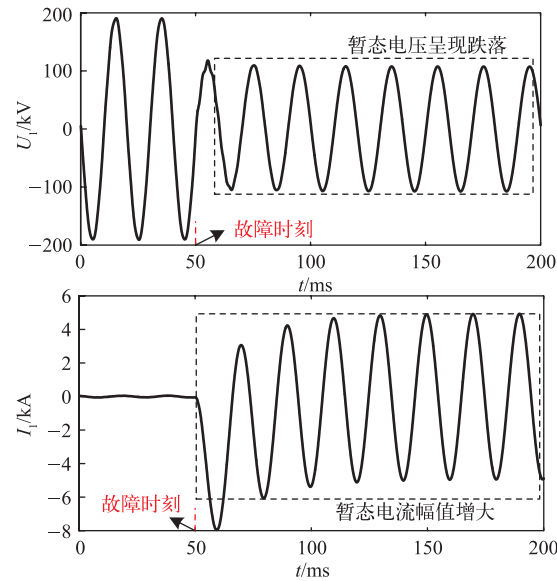


图2 典型故障的暂态电压和电流波形

图2为故障前后A相的电压和电流仿真波形图，其中故障时刻为5 ms。可见，故障前A相的电压呈现标准的正弦波形。故障后电压的幅值跌落很大，但没有跌落到零。这是由于风机的低穿控制启动，使得风电场能够暂时增大无功输出，以抬高系统电压。相比于故障前的负荷电流，故障后的暂态故障电流幅值增大几倍，这是由于接地回路的阻抗很小。上述仿真的电压和电流暂态波形与实际情况吻

合，因此，基于仿真模型进行故障测距算法验证是有效的。

以装置B处为起点，沿着线路L每隔10 km设置故障点，获取故障后的电压、电流值。以启动判据标定的故障零点为基准，取计算故障距离在（101~150）范围内平均值。再考虑实时权重，得到融合后的测距结果见表1。结果显示全线测距的误差均小于5%，验证了本案例所用方法的有效性。

表1 融合测距结果

距离	权重	DS	误差（%）
1	[0.1 0.05 0.04]	1.02	2.00
10		9.78	2.20
20		20.41	2.05
30	[0.12 0.04 0.03]	28.82	3.93
40		41.24	3.10
50	[0.15 0.026 0.014]	49.13	1.74
60		62.23	3.72
70	[0.2 0.02 0.01]	68.25	2.50
80		83.53	4.41

结束语

海上风电是解决能源危机和环境问题的有效方式之一，已成为可再生能源应用领域的重要发展方向。其中，保障海上风电送出通道的安全稳定运行是亟待解决的关键问题之一。为此，本文提出了一种基于多频带信息的海上风电场送出线电缆的故障检测和定位方案，基于实时的电压变换率和电流极性来实现故障检测；再基于多频带故障信号求解故障距离，最后求得融合测距结果；通过挖掘多频带信息，保障了算法在线路全长的测距精度，有较好的工程实用性。EA

（收稿日期：2024-03-18）

参考文献

[1] 李玉齐，张健．关于微网的新型配电系统研究概述与思考[J]．电气技术，2020，21(5)：1-5，14．
[2] 白桦，王正用，李晨，等．面向电网侧、新能源侧及用户侧的储能容量配置方法研究[J]．电气技术，2021，22(1)：8-13．