第41卷 第8期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 8
2020年8月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Aug., 2020

文章编号:0254-0096(2020)08-0323-07

基于参数估计的风电场混合输电线路故障定位方法

张 科[1]，马长啸[2]，曹雁庆[2]，朱永利[1]，郑艳艳[1]，高佳程[1]

（1. 华北电力大学电气与电子工程学院，保定 071003；2. 国电电力发展股份有限公司，北京 100101）

摘 要：为解决风电场因短路故障造成的弃风窝电现象，提出一种基于参数估计的风电场故障定位方法。利用行波特性构建包含故障点位置的传输方程，采用参数估计理论求解多测点传输方程形成的超定方程组，得到故障位置。通过参数估计的数据检错能力判定不良数据并将其剔除，提升定位精度。该算法结合故障区间判据，可解决风电场节点附近短路时的故障分支误判问题，且可克服传统方法需计算行波波速的缺点。通过PSCAD/EMTDC验证其有效性，可用于风电场混合输电线路故障定位中。

关键词：故障定位；参数估计；风电；输电线路；多元线性回归；混合输电

中图分类号：TM773 **文献标志码**：A

0 引 言

近年来，风力发电作为新能源发电形式倍受关注。风力发电无论是装机容量还是发电量都在逐年递增。然而，由于风电场结构复杂、环境恶劣，导致输电线路故障频发，弃风窝电现象严重，阻碍了风力发电的发展，因此在风电场输电线路故障后对故障点的快速查找和修复十分重要。但由于风电场的特殊性，导致常规故障定位方法在风电场中并不实用。

风电场属于多分支混合线路输电系统，但其故障定位方法却少有研究。文献[1-2]适用于T接线路，不能向多分支输电线路的故障定位拓展。文献[3-4]提出适于多分支的定位算法，分为2步：1)判断故障所在支路；2)将网络简化为含故障点的双端线路进行定位。但该方法不适用于风电场这类短且混合的输电线路。文献[5-6]提出混合输电线路故障定位方法，采用等效思想将波速均一化，但理论线路参数的引入导致误差较大。

本文针对风电场结构特点，提出适用于风电场混合输电线路的故障定位方法。利用电流行波信息，构建传输方程组。考虑测量误差，建立多元线性回归模型，并结合参数估计理论对方程组求解。该方法可避免波速计算问题，且考虑线路的混合特性，可解决混合线路定位精度差甚至定位错误问题，此外参数估计的数据检错能力保证了定位结果的可靠性。

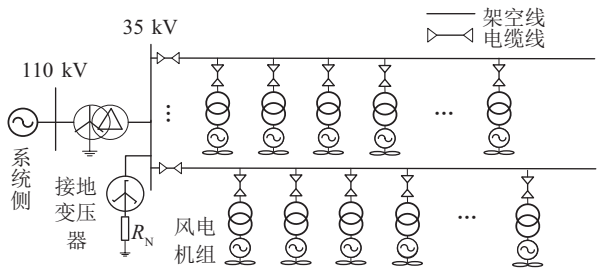
1 风电场模型

图1为目前大型风电场的结构示意图[7]。目前，大型风电场结构具有以下特点：

1)风电场架空线、电缆混合。风电机组一般经十几米电缆接入集电线路(架空线)，且一条集电线路一般接入十几台风电机组；集电线路与110 kV变电所的低压侧35 kV母线之间因接线问题需由电缆连接。

2)风电机组之间距离较短，一般为几百米到几千米。由于风能资源分布不均匀，且风能资源所在地势差异很大，途径平坦区和山地，导致相邻风电机组间的距离存在较大差异。

3)由图1b可知，风电场是一个典型辐射网，且接入了大量风电机组。此外，就单条集电线路而言，总长一般在20 km之内，线路较短。

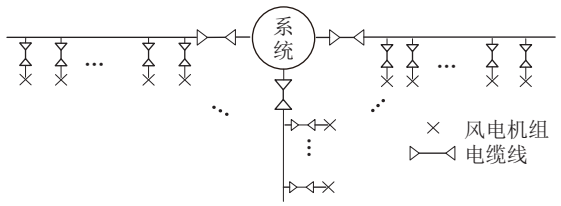


a. 实际风电场结构图

收稿日期：2018-03-11

基金项目：国家自然科学基金(51677072)；中央高校基本科研业务费专项资金(2017XS118)

通信作者：朱永利(1963—)，男，博士、教授，主要从事输变电设备状态监测与故障诊断等方面研究。yonglipw@163.com



b. 风电场等效拓扑图

图1 风电场结构及其等效图

Fig. 1 Wind farm structure and equivalent diagram

以上特点导致常规定位算法在风电场的故障定位中存在一定难度。

2 风电场故障定位原理及其方法

考虑到风电场因其结构特殊性导致常规定位方法定位精度不高甚至不适用的问题，本文提出一种新的故障定位方法。

2.1 构建传输方程

风电场故障时，由故障点产生的行波在风电场线路上沿最短路径传输到各终端。对于某终端而言，最短路径与行波到达终端时刻存在函数关系，定义为“传输方程”。假设故障发生在分支节点 i~ 节点 j 上，则故障点到达终端的传输方程为：

$$t_m = l_{pm}/v_1 + l_{qm}/v_2 + l_{ij\text{-}f}/v + t_0 \tag{1}$$

式中，t_m ——第 m 测点测得行波到达时刻，m=1,2,…, n，n 为测点总数；l_{pm} 、l_{qm} ——行波从故障点到达第 m 测点经过的架空线、电缆长度总和(p 代表架空线，q 代表电缆)；$l_{ij\text{-}f}$ ——故障分支 l_{ij} 在由故障点到 m 测点的最短路径中所占的长度(f 表示故障)；v_1 、v_2 ——架空线、电缆的行波波速；v ——故障线路 l_{ij} 上的行波波速，其值根据线路类型决定；t_0 ——故障发生时刻。

考虑到风电场主要针对集电线路短路故障进行研究，所以假设故障分支类型为架空线，其对应波速 $v=v_1$。故障点的存在将风电场分为 2 部分，在故障分支上行波有 2 个传输方向。对于传输方程而言，存在 2 种类型，其中 $l_{ij\text{-}f}$ 为故障点到节点 i 或 j 的距离。为统一这 2 类方程的形式，规定 $l_{ij\text{-}f}$ 为故障点到节点 i 的距离(i 为靠近系统侧的节点)。

对 2 类方程整理可得：

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_k \\ t_{k+1} \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{p1} & l_{q1} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{pk} & l_{qk} & 1 & 1 \\ l_{pk+1}+l_{ij} & l_{qk+1} & -1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{pn}+l_{ij} & l_{qn} & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dfrac{1}{v_1} \\ \dfrac{1}{v_2} \\ \dfrac{l_{ij\text{-}f}}{v_1} \\ t_0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，(1~k 行)为包含 i 节点的最短路径传输方程；(k+1~n 行)为包含 j 节点的最短路径传输方程，式(2)简写为式(3)。

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{t}$ ——各测点行波到达时刻列向量；$\boldsymbol{A}$ ——式(2)系数构成的矩阵，称为系数矩阵；$\boldsymbol{x}$ ——自变量为波速、长度系数、故障发生时刻构成的列向量。

考虑到测量误差等误差因素，可将式(2)写为：

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\delta} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{\delta}$ ——各测点的测量误差向量。

由式(2)可知，已知量为 t_m，待求解的 4 个未知量为 v_1、v_2、$l_{ij\text{-}f}$、t_0。当误差为零时，n<4 (n 为传输方程数量)，式(2)有无穷解；n=4 时，式(2)有唯一解；n>4 时，式(2)为超定方程组，一般无解或者无解析解。此外，若考虑式(4)的误差因素，采用线性代数思想求解式(4)将造成误差增大甚至计算结果错误。

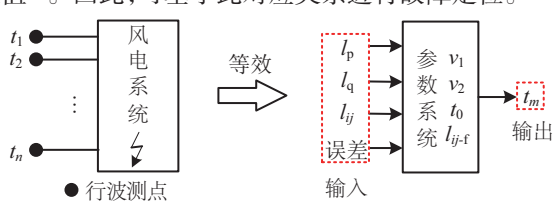
2.2 参数估计实现故障定位

式(4)为一个多元线性方程组，其中 t 为因变量，x 为自变量。对于某一点短路故障而言，x 是定值，则每个测点都对应一组唯一的传输方程系数[8]。而多元线性回归参数估计是通过多组自变量、因变量的实验值对其系统恒定系数进行估计的。二者十分相似，将式(4)中的系数、自变量和多元线性回归中的自变量、参数对应，可得线性回归模型为：

$$\begin{aligned} t_m &= t_0 + \frac{1}{v_1}l_{pm} + \frac{1}{v_2}l_{qm} + \frac{l_{ij\text{-}f}}{v_1} + \delta_m \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_{1m} + \beta_2 x_{2m} + \beta_3 x_{3m} + \delta_m \end{aligned} \tag{5}$$

式中，β_0 、β_1 、β_2 、β_3 ——线性回归中的参数；x_{1m} 、x_{2m} 、x_{3m} ——回归模型中的自变量；δ_m ——第 m 个测点的测量误差。

参数估计实现故障定位的原理可由图 2 模型解释。图 2a 所示的风电场发生故障时多个测点同步测量结果可等效为图 2b 固定参数系统在不同输入下的多组测量结果。而固定参数系统可运用多元线性回归对多组测量结果进行参数估计，从而还原出参数系统中的参数值[9]。因此，可基于此对应关系进行故障定位。



a. 真实测量系统 b. 等效的多次测量系统

图2 风电场参数估计原理图

Fig. 2 Wind farm parameter estimation principle diagram

采用多元线性回归模型求解传输方程如下文。

2.2.1 求解待估计参数

图 2a 中测点 m 的传输方程与图 2b 中参数系统第 m 次测量值对应为：

$$t_m=\beta_0+\beta_1x_{1m}+\beta_2x_{2m}+\beta_3x_{3m}+\delta_m,\ m=1,2,\cdots,n \quad (6)$$

构建多元线性回归模型的正规方程组(7)，求解该方程组，得待估计参数的估计值 β_j。

$$\begin{cases}\sum_{m=1}^{n}t_m=\beta_0\sum_{m=1}^{n}1+\sum_{j=1}^{3}(\beta_j\sum_{m=1}^{n}x_{jm})\\ \sum_{m=1}^{n}x_{1im}t_{im}=\beta_0\sum_{m=1}^{n}x_{1im}+\sum_{j=1}^{3}(\beta_j\sum_{m=1}^{n}x_{1m}x_{jm})\\ \sum_{m=1}^{n}x_{2m}t_m=\beta_0\sum_{m=1}^{n}x_{2m}+\sum_{j=1}^{3}(\beta_j\sum_{m=1}^{n}x_{2m}x_{jm})\\ \sum_{m=1}^{n}x_{3m}t_m=\beta_0\sum_{m=1}^{n}x_{3m}+\sum_{j=1}^{3}(\beta_j\sum_{m=1}^{n}x_{3m}x_{jm})\end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 不良数据检测

多元线性回归模型求解后，需检测样本的不良数据并将其剔除，保证数据可靠性。采用样本残差的置信区间作为衡量判断不良数据的标准。绘制样本残差置信区间图，当所有样本残差的置信区间均包含零点，说明回归模型能较好地符合原始数据，否则可视为异常点进行剔除[10]。

2.2.3 回归模型检验

1)拟合度程度检验，该检验方法主要运用多重判定系数 R^2 衡量多元线性回归的拟合度程度，R^2 值越接近1，回归拟合程度越高。定义为：

$$R^2=\frac{SSR}{SST}=1-\frac{SSE}{SST}=1-\frac{\sum(t_m-t_m')^2}{\sum(t_m-\bar{t})^2} \quad (8)$$

式中，SSR ——回归平方和；SST ——总离差平方和；SSE ——残差平方和；t_m' ——第 m 个测点估计值；$\bar{t}$ —— n 个测量量的平均值。

2)残差的正态性检验，一般为 2 个过程：Jarque-Bera 检验和 t 检验。Jarque-Bera 检验可验证给定数据服从未知均值和方差正态分布的假设是否成立。在正态性假定下，如果 JB 统计量的相伴概率值小于设定的概率水平，则拒绝原假设，不认样本概率服从正态分布；反之，则接受原假设。t 检验用于小样本($n<30$)的 2 个平均值差异程度的检验方法。它用 T 分布理论来推断差异发生的概率，判定 2 个平均数的差异是否显著，证明残差是否服从均值为零的正态分布。

3)残差的异方差检验，采用 Goldfeld-Quandt 检验(简称为 G-Q 检验)，将样本按解释变量排序后分为 2 部分，利用样本 1 和样本 2 分别建立回归模型，并求出其残差平方 RSS_1 和 RSS_2。若误差项的离散程度相同(即为同方差)，则 RSS_1 和 RSS_2 的值应大致相同；若两者之间存在显著差异，则表明存在异方差。检验过程中为了“夸大”残差的差异性，一般先在样本中部去掉 c 个数据(通常取 $c=n/4$)，再利用 F 统计量判断差异的显著性：

$$F=\frac{RSS_2/((n-c)/2-k-1)}{RSS_1/((n-c)/2-k-1)}=\frac{RSS_2}{RSS_1}\sim F(\frac{(n-c)}{2}-k-1,\frac{(n-c)}{2}-k-1) \quad (9)$$

式中，n ——样本容量；k ——自变量数量。

4)对残差进行自相关性的检验，通常利用 DW 检验检测残差序列的自相关性，其统计量为：

$$DW=\sum_{t=2}^{n}(e_t-e_{t-1})/\sum_{t=1}^{n}e_t^2 \quad (10)$$

式中，n ——样本容量；e_t ——残差序列。

对计算结果 DW 通过查表决定是否存在自相关性。包含以下 4 种情况：1) $dU<DW<4-dU$ ，不存在自相关性；2) $DW<dL$ ，存在一阶正相关；3) $DW>4-dL$ ，存在一阶负相关；4) $dL<DW<dU$ 或 $4-dU<DW<4-dL$ ，无法判断。

2.3　风电场测点配置

联立各测点的传输方程可进行故障定位。但对风电场而言，每个风电机组相当于一个终端，由于相邻终端间距极短，若各终端都装设行波测点不仅不可行，而且会产生大量相似数据，放大误差，所以必须根据风电场特点，合理配置测点。

根据图 1b 可知，可将风电场看作一张以系统为中心节点的典型辐射网。本文拟采用的测点配置方案为每条架空线终端的风电机组和距离线路中点最近的风电机组作为行波测点，110 kV 变电站的 35 kV 母线也作为一个行波测点。以 5 条集电线路构成的风电场为例，构成图 3 所示的测点网络(图 3 测点未装设在集电

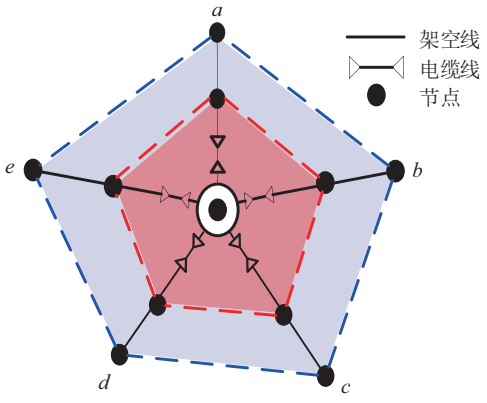


图3　风电场测点配置图

Fig. 3　Wind farm measuring point configuration diagram

线路上),其中,外侧虚线所连测点为架空线终端测点,内侧虚线所连测点为线路中点测点。

3 故障区间预判

本文的参数估计故障定位法,需先判断出故障点存在于图3网络中某一区间,即中心点、内侧虚线构成的区域或内侧虚线与外侧虚线构成的区域。

3.1 故障区间判据

根据图3,可得各区间线路行波传输所需的理论时间,将其生成时间差矩阵 $\boldsymbol{\Delta t}$。$\boldsymbol{\Delta t}$ 为 $3\times r$ 的矩阵,r 为风电场中架空线数量。该矩阵的构成:1)第1行元素为终端测点与中心测点理论上的行波时间差;2)第2行元素为中间测点与中心测点理论上的行波时间差;3)第3行元素为终端测点与中间测点理论上行波时间差。其次,根据各测点实测时刻建立实际的时间差矩阵 $\boldsymbol{\Delta t}'$,将 $\boldsymbol{\Delta t}$ 与 $\boldsymbol{\Delta t}'$ 作差得差分矩阵 $\boldsymbol{\Delta}$。由于 $\boldsymbol{\Delta t}$ 采用理论波速,导致差分矩阵 $\boldsymbol{\Delta}$ 在无故障区间的值并非零,而是存在一个微小偏差,所以需要设定一个阈值(其值根据基于理论波速的最大定位误差确定),使当差分矩阵元素值低于该阈值时,将该元素置为零。差分矩阵 $\boldsymbol{\Delta}$ 的第1行检测哪条集电线路发生故障,第2行检测线路前半区间是否发生故障,第3行检测线路后半区间是否发生故障。

以式(11)为例阐述故障区间判据,L_1~L_5 表示图3中的5条集电线路,假设线路 L_4 的后半段区间发生短路故障,则生成的差分矩阵如式(11)所示。式中 $\boldsymbol{\Delta}$ 的第1行不为零的元素只有 L_4 对应的元素,说明集电线路 L_4 发生短路故障;第2行 L_4 对应元素为零,说明架空线 L_4 的前半段区间发生短路故障;第3行中 L_4 对应元素不为零,说明架空线 L_4 的后半段区间发生短路故障。

$$\begin{matrix} & L_1 & L_2 & L_3 & L_4 & L_5 \end{matrix}$$
$$\boldsymbol{\Delta}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

上述是线路故障的一般情况,但当故障发生在测点(或节点)附近时,其差分矩阵为式(12):

$$\begin{matrix} & L_1 & L_2 & L_3 & L_4 & L_5 \end{matrix}$$
$$\boldsymbol{\Delta}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式(12)无法判断故障发生在何处。因为在测点(或节点)附近故障时,L_4 列元素的时间差很小,未达到阈值上限而被置零,导致无法判断故障所在区间,所以应针对该情况展开研究。

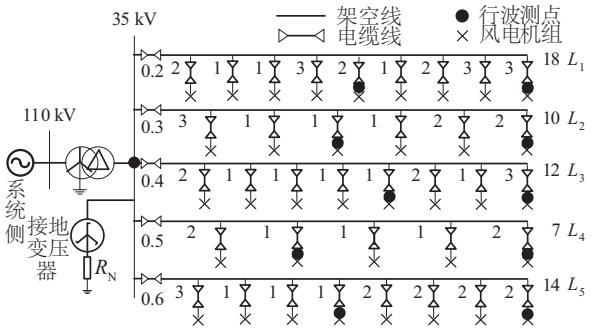
3.2 节点附近故障时的判据

在节点处安装的测点可划分为:终端测点、中间测点、中心测点3种类型。其中,终端测点可由行波时刻直观判断,不予考虑。对于中间测点,考虑到算法简洁性,当某一中间节点附近发生短路故障时,人为删除该测点传输方程,从而消除误判可能性。当中心节点附近故障时,由于其连接多条集电线路,不能直接得到判据,但可结合本文参数估计算法得出其判据。分别假设与中心节点相连的各集电线路故障,采用参数估计方法得到定位结果。通过判断其定位结果的合理性确定真实的故障分支。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

本文采用有5条架空线的风电场进行仿真验证。风电场仿真模型见图4,其中各行波测点位置在图中已标出。每条集电线路上装设2个测点,按线路编号从左到右、从上至下依次编号,35 kV母线处装设一个测点,总共11个测点。本文从以下方面验证算法可行性:1)不同故障位置;2)对测量数据加入个别错误数据;3)对节点(行波测点)附近故障时的故障区间识别。



注:线路长度单位为km,L_1~L_2代表集电线路编号

图4 风电场仿真模型

Fig. 4 Wind farm simulation model

4.2 故障定位结果及分析

4.2.1 算法演示

1)区间识别。以集电线路 L_1 发生单相接地故障进行仿真,故障位置距首端(电缆端)8 km,故障发生时刻为0.03 s。各测点的行波波头到达时刻见表1。

表1　测点行波信息(×10⁻² s)

Table1　Traveling wave point information(×10⁻² s)

测点	1	2	3	4	5	6
t	3.0003	3.0032	3.0048	3.0066	3.0052	3.0074
测点	7	8	9	10	11	
t	3.0044	3.0058	3.0056	3.0082	3.0028	

无故障时风电场的理论时间差矩阵 $\boldsymbol{\Delta t}$（单位为μs）为：

$$\boldsymbol{\Delta t}=\begin{bmatrix}63.48 & 37.30 & 45.19 & 29.24 & 54.16\\ 32.82 & 20.27 & 24.75 & 16.69 & 26.91\\ 30.66 & 17.03 & 20.44 & 13.63 & 27.25\end{bmatrix} \tag{13}$$

各测点的实际测量的时间差矩阵 $\boldsymbol{\Delta t}'$（单位为μs）为：

$$\boldsymbol{\Delta t}'=\begin{bmatrix}4.00 & 38.00 & 46.00 & 30.00 & 54.00\\ 25.00 & 20.00 & 24.00 & 16.00 & 28.00\\ 29.00 & 18.00 & 22.00 & 14.00 & 26.00\end{bmatrix} \tag{14}$$

式(13)、式(14)作差并设定阈值，得到差分矩阵$\boldsymbol{\Delta}$（单位为μs）为：

$$\boldsymbol{\Delta}=\begin{bmatrix}59.42 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 7.82 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{15}$$

从差分矩阵第1行元素可知，集电线路 L_1 故障，由第2行、第3行的第1列元素可知，故障发生在集电线路 L_1 的前半段（中心节点和中间节点的59.42和7.82区域）。

2）故障定位。根据测点信息列写测点的传输方程。以3号测点（即集电线路 L_2 的左一测点）为例，列写其传输方程为：

$$5\frac{1}{v_1}+0.5\frac{1}{v_2}+1\frac{l_{ij\text{-}f}}{v}+t_0=0.030048 \tag{16}$$

联立所有的测点传输方程，采用参数估计理论求解式(7)，得待估计参数，结果见表2。表2中，决定系数 R^2 接近于1，说明该回归模型的拟合程度良好。$F(1,n-2)$ 分布大于 F 值的概率 $p<\alpha$（本计算中设置显著性水平为0.05），说明回归模型有效。

表2　参数估计结果

Table 2　Parameter estimation results

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间
β_0	0.029999	[0.0299973×10, 0.0300004]
β_1	3.359867×10^{-6}	$[3.217847\times10^{-6}, 3.501888\times10^{-6}]$
β_2	1.228737×10^{-5}	$[0.854427\times10^{-5}, 1.603048\times10^{-5}]$
β_3	2.670558×10^{-5}	$[2.514667\times10^{-5}, 2.826447\times10^{-5}]$
	R^2=0.999241	F=3070.2392624
	$p<2.809021\times10^{-11}$	$s^2=5.437946\times10^{-13}$

由图5可知，各测点均无不良数据。本次参数估计结果正确。根据系数对应关系 $t_0\sim\beta_0$，$1/v_1\sim\beta_1$，$1/v_2\sim\beta_2$，$l_{ij\text{-}f}/v_1\sim\beta_3$，可得故障点到 i 节点的距离 $l_{ij\text{-}f}=\beta_3/\beta_1=7.9484$ km，误差为51.6 m。

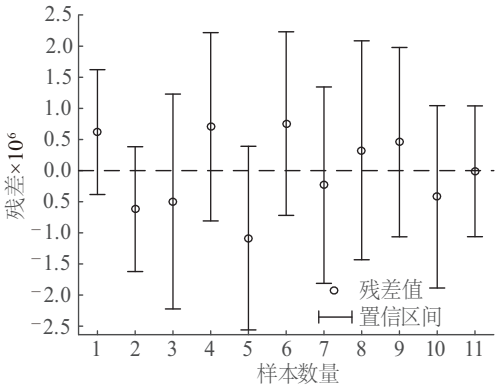


图5　样本残差的置信区间

Fig. 5　Confidence intervals of sample residuals

3）回归模型检验。①残差的正态性检验，JB检验的结果 $H=0$，表明残差服从正态分布；t 检验的结果 $H=0$，$p=1$，表明残差服从均值为零的正态分布。②残差的异方差检验，F 统计量的观察值 $f=46.7011<F(1,1)=161.4$，所以不存在异方差。③残差的自相关性检验，计算得到 DW=2.281，查 DW（德宾-沃森）统计量临界值表，可得 dL=0.396，dU=1.640，则1.640<DW<2.360。残差不存在自相关性。

4.2.2　不同故障位置的定位结果

不同故障位置的定位结果如图6所示。

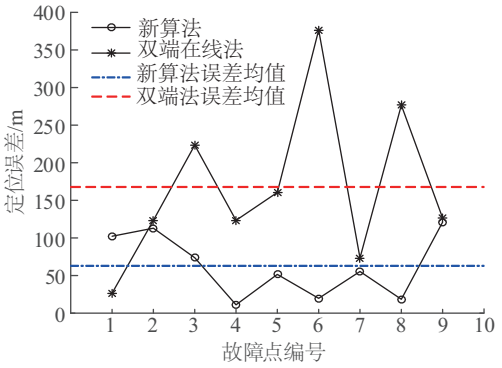


图6　各算法故障定位结果误差对比

Fig. 6　Error comparison of fault location results for various algorithms

4.2.3　测量数据中不良数据的辨识

对于不良数据的辨识验证，采用“算法演示”的仿真数据进行验证。更改测点11的值作为不良数据，其参数估计结果为 $l_{ij\text{-}f}=9.4875$ km，而真实值 $l_{ij\text{-}f}=8$ km。说

明存在不良数据时，定位结果错误。绘制各测点残差置信区间见图7，数据11为不良数据，将其剔除后，再次参数估计的定位结果为：$l_{ij\text{-}f}$=7.9537 km，误差为46.3 m。将不良数据剔除前后衡量参数估计质量的指标汇总于表3，可知剔除不良数据后的指标更优，则其参数估计准确度更高。

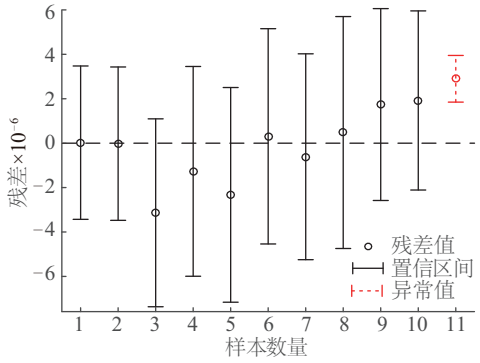


图7 含不良数据的样本残差置信区间

Fig. 7 Confidence intervals for sample residuals with bad data

表3 不良数据剔除前后的参数估计结果

Table 3 Bad data before and after excluding the parameter estimation results

剔除数据	R^2	F	p	s^2
前	0.9930	331.4340	6.6329×10^{-8}	4.6701×10^{-12}
后	0.9992	2368.0873	1.3140×10^{-9}	6.3436×10^{-13}

4.2.4 中心节点附近故障时的故障区间识别

设置集电线路L_1在距35 kV母线侧0.8 km处故障，故障类型为单相接地故障。本文“节点附近故障时的区间判据”计算的结果见表4。表4中只有线路L_1的定位结果具有合理性，则故障分支为架空线L_1，验证算法的正确性。

表4 假设各支路分别故障时的定位结果

Table 4 Location results assuming a short circuit in each line

线路号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
$l_{ij\text{-}d}$/km	0.8582	−2.8797	−2.8896	−3.5310	−4.1474

5 结 论

本文基于参数估计理论提出风电场混合输电线路故障定位方法，得到以下结论：

1)采用参数估计理论求解，实现了在风电场这类长度短且架空线-电缆混合线路中的故障定位，具有数据检错能力，提升了数据可靠性。通过PSCAD/EMTDC仿真验证了本文方法在风电场故障定位上的可行性。

2)本方法无需已知行波波速，避免了因行波波速计算误差对定位结果造成干扰的问题。

3)针对因节点附近故障造成区间误判的问题，提出可有效判断故障分支的判据。通过PSCAD/EMTDC仿真验证了算法的可行性。

致 谢：感谢中国国电集团公司科技项目的经费资助和国电电力河北新能源开发有限公司提供的帮助。

[参考文献]

[1] 施世鸿，何奔腾，张武军. T型高压输电线路故障测距[J]. 中国电机工程学报，2008，28(25)：105-110.
SHI S H，HE B T，ZHANG W J. Fault location for HV three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE，2008，28(25)：105-110.

[2] 田羽，范春菊，龚震东. 带同杆双回线的T型线路故障分支判定算法[J]. 电力系统自动化，2006，30(21)：71-76.
TIAN Y，FAN C J，GONG Z D. Faulted line selecting method of T circuit of parallel transmission lines[J]. Automation of electric power systems，2006，30(21)：71-76.

[3] GIRGIS A A，HART D G，PETERSON W L. A new fault location technique for two-and three-terminal lines[J]. IEEE transactions on power delivery，1992，7(1)：98-107.

[4] LIEN K P，LIU C W，JIANG J A，et al. A novel fault location algorithm for multi-terminal lines using phasor measurement units[C]//Power Symposium Proceedings of the North American IEEE，2005：576-581.

[5] 季涛，孙同景，徐丙垠，等. 配电混合线路双端行波故障测距技术[J]. 中国电机工程学报，2006，26(12)：89-94.
JI T，SUN T J，XU B Y，et al. Study on fault location of distribution mixed feeders based on double terminal method of traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE，2006，26(12)：89-94.

[6] 唐学用，黄民翔，尹晓光，等. 电缆-架空线混合输电线路故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(14)：69-73.
TANG X Y，HUANG M X，YING X G，et al. A study on fault locating methods based on hybird transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power system protection and control，2011，39(14)：69-73.

[7] 包能胜，朱瑞丹，倪维斗. 大型风电场电网三相短路

故障暂态分析[J]. 太阳能学报，2008，29(9)：1161-1166.
BAO N S，ZHU R D，NI W D. Transient dynamic analysis of large-scale wind farm with grid three-phase short circuit fault[J]. Acta energiae solaris sinica，2008，29(9)：1161-1166.

[8] 索南加乐，张怿宁，齐军，等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术，2006，30(8)：65-70.
SUONAN J L，ZHANG Y N，QI J，et al. Time domain fault location method based on transmission line parameter identification using two terminals data[J]. Power system technology，2006，30(8)：65-70.

[9] 姜臻，苗世洪，刘沛. 基于故障可观性的输电线路故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(15)：1-9.
JIANG Z，MIAO S H，LIU P. Fault observability model based fault location technique for transmission grids[J]. Power system protection and control，2016，44(15)：1-9.

[10] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京：清华大学出版社，1993：79-132.

FAULT LOCATION BASED ON PARAMETER ESTIMATION IN HYBRID TRANSMISSION LINES OF WIND FARM

Zhang Ke[1]，Ma Changxiao[2]，Cao Yanqing[2]，Zhu Yongli[1]，Zheng Yanyan[1]，Gao Jiacheng[1]
(1. *College of Electrical & Electronic Engineering*，*North China Electric Power University*，*Baoding* 071003，*China*；
2. *GD Power Development Co.*，*Ltd.*，*Beijing* 100101，*China*)

Abstract：In order to solve the problem of abandoned wind due to short circuit faults in wind farms，a wind farm fault location method based on parameter estimation is proposed. Traveling wave characteristics are used to construct transfer equations including fault point location. The location of the fault is obtained by solving the overdetermined equations formed by the multi-measurement point transmission equations through parameter estimation theory. The parameter estimation data error detection can determine and remove bad data to improve the positioning accuracy. Combined with the fault section detection，this algorithm solves the fault branch misjudgment problem in the short circuit near the wind farm's node. It overcomes the shortcomings of the traditional method in calculating the traveling wave velocity. The effectiveness of this method is verified by using PSCAD/EMTDC simulation software and the results show that it can be used to detect fault locations of transmission lines in the wind power farms.

Keywords：fault location；parameter estimation；wind power；transmission line；multiple linear regression；hybrid transmission