

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231512

# 基于双层负序差值与负序测距的风电场集电线 不对称故障定位

丁嘉, 朱永利, 魏源

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对风电场集电线上复杂电源密集接入使得现有定位方法应用困难的问题, 提出一种基于双层负序差值与负序测距的风电场集电线故障定位方案。首先, 深入分析风机故障电流特性, 从负序分量出发实现风机建模, 同时计及风电场结构特点对其负序网络实施等效。然后, 引入故障模拟策略, 通过负序电压差值表征模拟故障与实际故障的差异以识别故障区域第一节点, 进一步探究从实际故障场景到特定模拟故障场景的负序电压变化趋势, 并定义负序电压比消除故障点电流影响, 由此提出负序电压比差值判据以实现故障区域第二节点识别。最后, 针对故障区域利用双端负序量推导测距公式确定故障位置。PSCAD/EMTDC 验证表明, 所提方案能够以较少测点计及含线路分支集电线的适用性准确定位集电线各类不对称故障, 且定位效果不受故障位置、过渡电阻、风机、风速分布及相量不同步等因素影响。

**关键词:** 负序电压差值; 负序电压比差值; 负序测距; 风电场; 集电线; 不对称故障; 故障定位

## Bi-level negative-sequence difference and negative-sequence fault distance calculation-based fault localization for asymmetric faults of collecting lines in wind farms

DING Jia, ZHU Yongli, WEI Yuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The collecting line in wind farms is accessed in a dense fashion by complex power sources. This makes existing fault localization methods inapplicable. Therefore a fault localization method for asymmetric faults is proposed based on bi-level negative-sequence difference and negative-sequence fault distance calculation. First, the fault current characteristics of wind turbines (WTs) are analyzed, based on which mathematical models of WTs can be constructed from the perspective of negative-sequence. The equivalence of wind farm negative-sequence networks is further implemented considering the structural characteristics of wind farms. Then, introducing a fault simulation strategy, the difference between simulated and actual faults is characterized by the negative-sequence voltage difference to identify the first node of faulty areas. The variation trend of negative-sequence voltage from actual fault scenarios to specific simulated fault scenarios is explored, and the negative-sequence voltage ratio is defined to eliminate the effect of fault point current. From this a criterion based on the negative-sequence voltage ratio difference is proposed to achieve identification of the second node of faulty areas. Finally, fault locations are determined by a fault distance calculation formula derived from the two-terminal negative-sequence quantity of faulty areas. Verification results from PSCAD/EMTDC show that the proposed method can accurately locate various asymmetric faults of collecting lines by just a few measurement points. The applicability to collecting lines with line branches is also considered. The localization performance is not affected by fault locations, fault resistance, WTs, wind speed distribution or asynchronous data.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677072).

**Key words:** negative-sequence voltage difference; negative-sequence voltage ratio difference; negative-sequence-based fault distance; wind farm; collecting line; asymmetric fault; fault localization

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677072)

## 0 引言

为助力“双碳”目标的实现，新型能源体系与新型电力系统建设持续推进，以风电为代表的新能源发电形式保持强劲发展势头<sup>[1-3]</sup>。但是，我国风电场多位于山地、戈壁等地，恶劣的环境导致场内集电线短路几率较大，而集电系统的特殊性又使其故障定位相当困难。这已成为行业难点，亟需提出有效的故障定位方案以优化风电场运行。

电力线路的故障定位方法主要可以分为故障分析法<sup>[4-7]</sup>、行波法<sup>[8-11]</sup>和人工智能法<sup>[12-15]</sup>。文献[4]分别从输电线两端计算故障点正负序电压之比、正序电压与正序电压故障分量之比，进而基于比值相等原则能够在非同步下有效实现各类故障的测距。文献[8]基于配电网拓扑与行波传播特性提出一种故障状态表达式，进而形成故障搜索矩阵及辅助矩阵以识别故障区段，并最终定位故障点。文献[12]在主动配电网中充分利用故障前后各特征通道的相关性，构建基于时序卷积残差网络的故障诊断模型，可以有效实现故障选相与故障区段定位。

当前，关于输配电网故障定位的研究已经较为广泛，但是风电场集电线故障定位问题尚处于研究初期。集电线结构特殊，存在复杂电源密集接入的特点，现有输配电网故障定位方案难以适用。应用故障分析法进行集电线故障定位的关键在于要较好地处理风机电源对故障定位的影响。文献[16]深入分析风机故障特性，借助集电线零序电流推导风机故障电流估计公式，由此对单端阻抗测距方法进行改进，进而通过逐区段设定故障假设能够准确计算故障距离；但是，对于含线路分支集电线，文献[16]所提方案易出现伪故障点。文献[17]首先基于零序电流特征判断故障区段，然后在相邻风机之间进行单端阻抗法定位，这样可以很好地消除风机对故障定位的影响。但是，其所需测点的数目几乎与风机数目相等，且测点均布置在线路上，安装难度较大。在行波法方面，集电线较短，为保证定位精度需提高行波采集装置的采样率，同时众多风机支路也使得行波折反射频繁、特定波头识别困难。文献[18]以波速、故障时刻、故障位置为未知量，综合多点信息构建传输方程组，并借助多元线性回归参数估计进行求解，结合故障区段预判能够较好地定位集电线各类短路故障。但是，文献[18]并未讨论装置采样率等对故障定位的影响。文献[19]在利用零序电流特征进行故障区段判断的基础上，通过故障区段两端的行波折反射信号实施测距，同时引入灰色理论实现采样频率的等效增大，较好地解决了采样

频率对短线路定位精度的影响。但是，上述方案在故障区段判断与故障测距上都需要大量测点，实现成本过高。另外，文献[18-19]都是针对不含线路分支的集电线进行定位，没有考虑到方案对于含线路分支集电线的适用性。在人工智能法方面，文献[20]采用基于变量预测模型的类型判别算法构建变量预测模型矩阵，由此计算特征集合的误差平方和能够实现集电线上故障区段的判断。但是，这一方法仍然需要在任意两个相邻风机之间布置测点，所需测点过多。文献[21]只利用集电线首端的电压电流信息，引入长短期记忆网络构建“端到端”定位模型以实现故障测距，获得了较好的应用成效。基于人工智能的定位方法得益于人工智能强大的特征提取能力，无需进行复杂的故障分析，但是其定位效果依赖算法性能，同时面临样本不平衡等因素影响，因此还需进一步研究。

为了兼顾风机影响、测点数目、线路分支等集电线故障定位关键问题，本文提出一种基于双层负序差值与负序测距的风电场集电线不对称故障定位方案。首先，本文在介绍风电场结构的基础上，分析风机故障特性，构建风电场负序网络，并实施针对性等效。然后，采用故障模拟策略，通过负序电压差值衡量故障场景的相似性识别故障区域第一节点，同时讨论实际故障场景与特定模拟故障场景的电压数值关系，探究电压变化特征，由此定义负序电压比差值实现故障区域第二节点的识别。进一步，计算故障区域双端负序量，通过故障区域负序测距确定故障点。最后，利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型进行方案验证。

## 1 风电场结构及其负序网络

### 1.1 风电场结构

图 1 所示为风电场典型结构，其中以集电线首末端以及各线路分支引出点作为系统节点。风电场主要由升压站、集电线和风电机组及其出口处的箱式变压器(箱变)构成。集电线用于汇集各风机电能，其广泛采用 35 kV 电压等级，箱变用于将风机出口电压从 690 V 升压至 35 kV。单条集电线的长度较短<sup>[18]</sup>，一般在 10 km 左右，但是其往往会连接十几台风机，这使得相邻风机距离很近。另外，由于风速随机、风机运行受控制策略影响，故障情况下风机运行特性一般来讲较为复杂。因此，集电线存在复杂电源密集接入的特点。同时，某些集电线可能会包含线路分支，如集电线 1，但是线路分支的数量会远少于配电网。

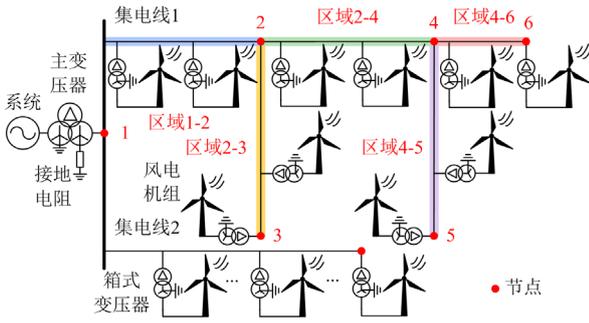


图1 风电场结构

Fig. 1 Structure of wind farms

## 1.2 风电场负序网络

双馈风机是目前应用最多的机型, 本文以双馈风电场为研究重点进行故障定位。当集电线出现微弱故障时, 如单相接地和过渡电阻较大的两相短路、两相接地, 风机仍会按照正常控制策略运行, 由于这种情况下风机内部不平衡较弱, 可认为风机仅作为正序电源提供短路电流, 进而风机负序模型可采用与一般同步发电机类似的负序阻抗模型。在较为严重的故障情况下, 如过渡电阻较小的两相短路、两相接地, 系统电压有较大跌落, 风机内部的撬棒保护会在几毫秒内立即动作<sup>[22]</sup>, 从而将变流器短接, 此时风机会转变为不受变流器控制的异步电机运行。故障初期风机故障电流不仅包含直流与基频电流, 还包含衰减的转子频率电流, 该电流难以滤除<sup>[22-23]</sup>。在转子频率电流衰减完之前, 风机为异步发电机运行状况, 其模型较为复杂; 当该电流衰减完后, 风机则进入异步电动机运行状况, 模型更加简单。鉴于过于复杂的风机模型不利于后续定位计算, 且故障定位所用故障信息时长有限, 不一定能够等待转子频率电流衰减结束, 因此风机建模问题面临较大难点。然而, 由文献[23]可知, 转子频率电流并不包含负序分量, 因此借助这一特性, 在对风机电流进行差分滤波后从负序角度考量就可以把风机等效为一个负序阻抗。同时, 文献[22]表明风机在撬棒保护动作后的负序阻抗受转差率影响较小, 数值较为稳定; 并且分析风电场结构特点可知, 风机出口处的箱变为升压变, 变比为 35000/690, 将风机阻抗归算至集电线侧后, 风机支路(即风机与箱变)的阻抗将远大于线路阻抗, 因此风机阻抗存在一定的波动也不会对线路上电压电流产生较大影响。综上所述, 在不对称故障下, 各风机可看作稳定的负序阻抗, 由此就可以建立整个风电场的负序网络。

以图1中风电场集电线1为研究对象, 可建立对应负序网络如图2所示。图2中:  $f$  为故障点;

$z_s$  为故障集电线以外部分的等效负序阻抗;  $z_w$  为风机支路负序阻抗; 其他变量表示相应线路的线路阻抗。

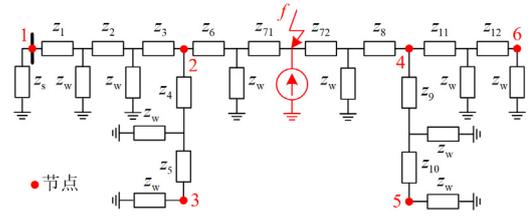


图2 风电场负序网络

Fig. 2 Negative-sequence network of the wind farm

为了保证所提方案对于含线路分支集电线的适用性, 本文首先将故障集电线划分为若干区域, 然后利用风电场负序网络进行故障区域识别、故障测距, 分两步实现故障点定位。

## 2 故障区域识别

针对含线路分支集电线, 以线路分支引出点为分割点, 可将集电线划分为若干不含线路分支的区域。对于图1所含集电线1, 可得各区域如图1中彩色标记部分所示。由此, 每个区域首末端各对应一个网络节点, 通过识别这两个节点就能够确定故障区域, 规定首先识别出的节点为故障区域第一节点, 其次识别出的节点为第二节点。

本文将故障模拟策略引入风电场负序网络, 通过模拟所得故障信息与实测故障信息之间的负序差异特征实现故障区域对应节点的识别。对于不含线路分支的集电线, 如集电线2, 可认为其本身即为一个区域, 故障后故障区域唯一, 无需专门识别。

### 2.1 故障模拟策略

在进行故障模拟时, 分别在风电场负序网络的各节点设置故障。将故障等效为一个外界注入电流施加到节点处, 然后构建风电场节点负序阻抗矩阵, 通过负序网络的电压电流方程实现各节点负序电压的计算, 计算公式如式(1)所示。

$$\dot{U}_{si} = Z_{i1} \dot{I}_{s1} + Z_{i2} \dot{I}_{s2} + \cdots + Z_{ij} \dot{I}_{sj} + \cdots + Z_{iN} \dot{I}_{sN} \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}_{si}$ 、 $\dot{I}_{si}$  分别为故障模拟时节点  $i$  的负序电压与负序注入电流;  $Z_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, N$ ) 为不计故障点时负序网络对应节点负序阻抗矩阵的元素;  $N$  为节点总数。若在节点  $k$  处模拟故障, 则取  $\dot{I}_{sk} = \dot{I}_f$ ,  $\dot{I}_f$  为实际故障点处的负序故障电流。

然而, 由图2可以看到, 集电线上存在众多风机阻抗, 这会使得节点阻抗矩阵的建立十分复杂。如上文所述, 归算后风机支路的阻抗远大于线路阻抗, 进而可知风机支路上的负序电流会远小于线路

电流, 因此能够对风电场负序网络进行如下等效: 节点处的风机支路阻抗保持不变, 将各区域内的风机支路阻抗等效至区域两端节点处, 即对某一风机支路阻抗  $z_w$  等效后, 区域两端节点各连接一个阻抗值为  $2z_w$  的并联阻抗。对图 2 进行上述等效, 所得网络如图 3 所示。由此, 节点阻抗矩阵将更容易建立。

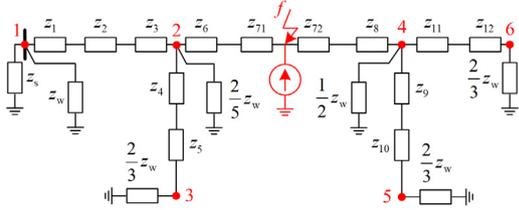


图 3 故障区域识别所用风电场负序网络

Fig. 3 Wind farm negative-sequence network for identification of faulty area

另外, 采用式(1)计算时需已知故障点负序故障电流, 其可由所测电气量计算得到。为了降低故障定位实现成本, 并考虑到测点配置难度, 所提方案仅在集电线首端与各末端风机的箱变低压侧设置测点, 用于获取集电线首端的节点电压、电流与末端的节点电压, 其中末端节点电压可由箱变低压侧的电压结合箱变阻抗得到。在风电场负序网络中, 将集电线整体看作一个等效节点, 那么有式(2)成立。

$$\dot{I}_f = -\dot{I}_{mc} - \sum_{h=1}^H \dot{I}_{wh} \quad (2)$$

式中:  $\dot{I}_{mc}$  为集电线首端负序电流(以流向线路为正方向);  $\dot{I}_{wh}$  为风机  $h$  支路上的负序电流(以流向线路为正方向);  $H$  为风机总数。

集电线首端负序电流通过升压站内的电流测点即可得到, 而风机支路负序电流则需通过所测电压近似计算得到。由于集电线较短、风机支路负序阻抗较大, 因此各风机支路上的负序电流大小较为接近, 可以近似取各风机支路上负序电流相等。为了减小近似误差, 并避免电压不同步的影响, 计算集电线首末端负序电压有效值的平均值, 并由该平均值与线路首端的负序电压相位构造出风机支路“综合负序电压相量”, 进而除以负序阻抗可得风机支路负序电流。

为克服相量不同步的影响, 本文仅利用各节点负序电压的有效值设计故障区域识别方案。同时, 利用式(1)计算节点负序电压有效值并不受相量不同步的影响。原因在于, 式(1)的各节点电流中实际上除  $\dot{I}_f$  外都为 0, 而  $\dot{I}_f$  是由一点(即集电线首端)所测电气量计算而来, 因此各节点负序电压也只与集

电线首端相量有关, 不受相量不同步影响。考虑到上述特点, 也可将式(1)转化为式(3), 进而得到式(4), 直接由式(4)来实现负序电压有效值的计算, 从而使复数运算转化为实数运算, 能够提高计算速度、简化方案实现的硬件设计。

$$U_{si} = |Z_{i1} \dot{I}_{s1} + Z_{i2} \dot{I}_{s2} + \dots + Z_{ij} \dot{I}_{sj} + \dots + Z_{iN} \dot{I}_{sN}| \quad (3)$$

$$U_{si} = |Z_{i1}| I_{s1} + |Z_{i2}| I_{s2} + \dots + |Z_{ij}| I_{sj} + \dots + |Z_{iN}| I_{sN} \quad (4)$$

## 2.2 基于负序电压差值的故障区域第一节点识别

在进行故障模拟时, 模拟故障节点越接近实际故障点, 模拟故障场景与实际故障场景就越相似, 那么故障模拟所得节点负序电压就会越接近实测值。因此, 通过衡量模拟故障与实际故障下节点负序电压的差异就能够识别出最接近实际故障点的节点, 该节点即为故障区域的第一节点。

为避免相量不同步降低差异衡量的准确性, 本文仅使用节点负序电压的有效值进行差异对比, 同样能够实现第一节点的有效识别。在衡量有效值差异时, 分别构建模拟故障与实际故障情况下的节点电压向量  $U_s$ 、 $U_m$ , 如式(5)和式(6)所示, 其中参与差异对比的节点 a、b、c、d 等为集电线首末端节点; 然后定义如式(7)所示的负序电压差值  $\Delta U$ , 并计算其 2 范数来表征电压差异的大小, 范数最小者对应的模拟故障节点即为故障区域第一节点。

$$U_s = [U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}, U_{sd}, \dots] \quad (5)$$

$$U_m = [U_{ma}, U_{mb}, U_{mc}, U_{md}, \dots] \quad (6)$$

$$\Delta U = U_s - U_m =$$

$$\left[ \frac{U_{sa} - U_{ma}}{U_{ma}}, \frac{U_{sb} - U_{mb}}{U_{mb}}, \frac{U_{sc} - U_{mc}}{U_{mc}}, \frac{U_{sd} - U_{md}}{U_{md}}, \dots \right] \quad (7)$$

式中:  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$ 、 $U_{sd}$  为模拟故障时各节点的负序电压有效值;  $U_{ma}$ 、 $U_{mb}$ 、 $U_{mc}$ 、 $U_{md}$  为实际故障时各节点的负序电压有效值。

## 2.3 基于负序电压比差值的故障区域第二节点识别

确定第一节点后, 与该节点相邻的某一节点将是故障区域的第二节点。由图 1 可知, 若第一节点为集电线首末端节点, 如图 1 中节点 1、3、5、6, 其相邻节点只有 1 个, 可直接确定该节点为第二节点。若第一节点为集电线内部节点, 如图 1 中节点 2、4, 其相邻节点各有 3 个, 需进一步识别。

### 2.3.1 负序电压变化特征

负序网络中只在故障点存在负序电源, 因此网络节点距离故障点越远, 节点负序电压越低。若以节点为参照, 当故障点远离节点时, 节点负序电压便会减小。从这一特征出发可实现第二节点的识别, 下面以图 1 中集电线 1 为例做进一步分析。

首先规定各区域的上下游节点：以母线到线路末端为正方向，位于某区域下游的节点为该区域下游节点，其余节点为该区域上游节点；如区域 2-3 的下游节点为节点 3，上游节点为节点 1、2、4、5、6。假设故障区域的第一节点为节点 2，若第二节点为节点 4，也就是实际故障位于区域 2-4，那么在节点 2 进行故障模拟时，相对于实际故障，模拟故障可以看作是将故障点由区域 2-4 内部移动到了节点 2。此时，区域 2-4 的下游节点 4、5、6 处的负序电压将会减小，即这些节点的实际负序电压大于故障模拟所得负序电压；区域 2-4 的上游节点 1、2、3 处的负序电压将会增大，即这些节点的实际负序电压小于故障模拟所得负序电压；上述电压变化特征汇总如图 4 所示。若第二节点为 1 或 3，归纳出各节点电压的变化特征如表 1 所示，同时给出了第一节点为节点 4 时的相关特征。

由表 1 可知，当不同区域故障时，从实际故障场景到第一节点处的模拟故障场景，区域上下游节点负序电压的变化特征存在明显差异，由此可实现故障区域第二节点的识别。

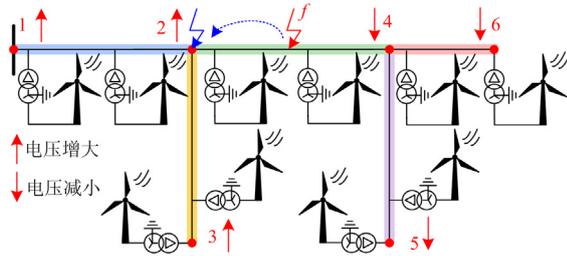


图 4 由实际故障至模拟故障的电压变化特征

Fig. 4 Voltage variation from actual faults to simulated faults

表 1 不同第二节点对应的电压变化特征

Table 1 Voltage variation for different second nodes

节点	第一节点为 2 时节点电压变化			第一节点为 4 时节点电压变化		
	第二节点为 1	第二节点为 3	第二节点为 4	第二节点为 2	第二节点为 5	第二节点为 6
1	减↓	增↑	增↑	减↓	增↑	增↑
2	增↑	增↑	增↑	减↓	增↑	增↑
3	增↑	减↓	增↑	减↓	增↑	增↑
4	增↑	增↑	减↓	增↑	增↑	增↑
5	增↑	增↑	减↓	增↑	减↓	增↑
6	增↑	增↑	减↓	增↑	增↑	减↓

注：表中增减是指从实际故障情况至模拟故障情况的变化。

### 2.3.2 负序电压比变化特征与负序电压比差值

负序网络中各节点负序电压实际上都可以由故障点负序故障电流及综合阻抗得到，如式(8)所示。

$$\dot{U}_i = Z_i \dot{I}_f \quad (8)$$

式中： $\dot{U}_i$  为节点  $i$  负序电压； $Z_i$  为节点  $i$  对应综合阻抗，该阻抗取决于节点与故障点的相对位置及其之间的网络结构。为进一步提高识别可靠性，减小故障点电流计算误差对第二节点识别的影响，可构建区域上下游节点负序电压比(有效值之比)，如式(9)所示，由此能够消去故障点电流，使故障特征仅取决于节点与故障区域的相对位置。

$$\frac{U_n}{U_m} = \left| \frac{Z_n \dot{I}_f}{Z_m \dot{I}_f} \right| = \left| \frac{Z_n}{Z_m} \right| \quad (9)$$

式中： $m$ 、 $n$  分别为某区域的上、下游节点； $U_m$ 、 $U_n$  分别为节点  $m$ 、 $n$  负序电压的有效值； $Z_m$ 、 $Z_n$  分别为节点  $m$ 、 $n$  的综合阻抗。在此基础上，可得不同第二节点对应的电压比变化特征如表 2 所示。

表 2 不同第二节点对应的电压比变化特征

Table 2 Voltage ratio variation for different second nodes

第一节点为 2 时节点电压比			第一节点为 4 时节点电压比		
第二节点为 1	第二节点为 3	第二节点为 4	第二节点为 2	第二节点为 5	第二节点为 6
$U_2/U_1 \uparrow$	$U_3/U_1 \downarrow$	$U_4/U_1 \downarrow$	$U_4/U_1 \uparrow$	$U_5/U_1 \downarrow$	$U_6/U_1 \downarrow$
$U_3/U_1 \uparrow$	$U_3/U_2 \downarrow$	$U_5/U_1 \downarrow$	$U_3/U_1 \uparrow$	$U_5/U_2 \downarrow$	$U_6/U_2 \downarrow$
$U_4/U_1 \uparrow$	$U_3/U_4 \downarrow$	$U_6/U_1 \downarrow$	$U_6/U_1 \uparrow$	$U_5/U_3 \downarrow$	$U_6/U_3 \downarrow$
$U_5/U_1 \uparrow$	$U_3/U_5 \downarrow$	$U_4/U_2 \downarrow$	$U_4/U_2 \uparrow$	$U_5/U_4 \downarrow$	$U_6/U_4 \downarrow$
$U_6/U_1 \uparrow$	$U_3/U_6 \downarrow$	$U_5/U_2 \downarrow$	$U_5/U_2 \uparrow$	$U_5/U_6 \downarrow$	$U_6/U_5 \downarrow$
—	—	$U_6/U_2 \downarrow$	$U_6/U_2 \uparrow$	—	—
—	—	$U_4/U_3 \downarrow$	$U_4/U_3 \uparrow$	—	—
—	—	$U_5/U_3 \downarrow$	$U_5/U_3 \uparrow$	—	—
—	—	$U_6/U_3 \downarrow$	$U_6/U_3 \uparrow$	—	—

注：表中增减是指从实际故障情况至模拟故障情况的变化。

由表 2 可知，与节点负序电压特征类似，针对不同的第二节点，从实际故障场景到模拟故障场景各负序电压比的变化特征也存在明显差异。因此，从表 2 中选取电压可测节点相应电压比，判断其对应特征是否成立即可识别出故障区域第二节点。以图 1 中区域 2-4 故障、第一节点为 2 为例，判断第二节点是否为节点 4 时所用电压比特征如图 5 所示。

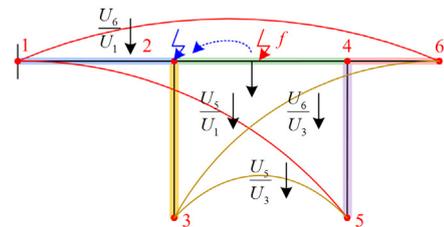


图 5 判断节点 4 是否为第二节点时所用电压比特征

Fig. 5 Voltage ratios for determining whether node 4 is the second node

在实际应用时,可通过计算实际故障与模拟故障对应负序电压比的差值来判断电压比变化趋势,如式(10)所示,其正、负分别对应电压比的增大、减小。另外,当节点负序电压变化量较小时,电压比差值的正负会表现出不确定性,但实际上这在一定程度上往往能够说明模拟故障节点是较为接近实际故障点,因此可直接认为该电压比符合表 2 特征。

$$\Delta_{n\_m} = \frac{U_{sn}}{U_{sm}} - \frac{U_{mn}}{U_{mm}} \quad (10)$$

式中:  $U_{sm}$ 、 $U_{sn}$  分别为模拟故障时节点  $m$ 、 $n$  的负序电压有效值;  $U_{mm}$ 、 $U_{mn}$  分别为实际故障时节点  $m$ 、 $n$  的负序电压有效值;  $\Delta_{n\_m}$  为节点  $n$  与节点  $m$  的负序电压比差值。

### 2.4 故障区域识别失效处理策略

在绝大多数情况下,故障区域的第二节点都能得到正确识别。然而,当故障点位于或非常接近线路分支引出点时,实际故障下与第一节点处模拟故障下各节点电压的数值会很相近。计及模型等效等各方面误差,表 2 中可能会有多个节点符合其对应的电压比变化特征,从而导致所得故障区域有多个,前文故障区域识别方法失效。由于出现上述现象的故障都是位于第一节点附近,因此此时实际上无需确定真正的第二节点,也无需进行故障测距,直接在第一节点附近寻找故障即可。

## 3 故障测距

在识别故障区域后需对故障区域进行测距。为提高测距精度,在故障测距时对前文负序网络等效方式做出调整,仅将故障区域内部的风机支路阻抗等效至区域两端,其余风机支路位置不变。假设图 1 中区域 2-4 故障,可得负序网络如图 6 所示。图中:  $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_4$  和  $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_4$  分别为故障区域首、末端负序电压和电流;  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$  分别为集电线首端负序电压、电流;  $\dot{U}_5$  为节点 5 负序电压;  $L$  为故障区域总长;  $l$  为故障点至故障区域首端的距离;  $z$  为单位长线

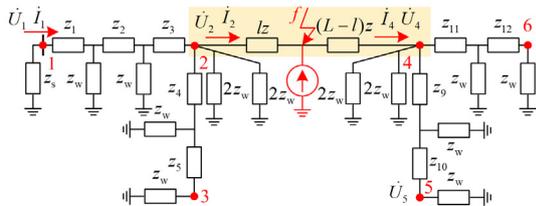


图 6 故障测距所用风电场负序网络

Fig. 6 Wind farm negative-sequence network for fault distance calculation

路阻抗;其他变量含义同图2。分别由节点2、4的负序电压电流计算故障点电压,可得式(11)。

$$\dot{U}_2 - \dot{I}_2 l z = \dot{U}_4 + \dot{I}_4 (L - l) z \quad (11)$$

进一步,对式(11)两端分别取模值平方以克服相量不同步对测距的影响,从而有

$$|\dot{U}_2 - \dot{I}_2 l z|^2 = |\dot{U}_4 + \dot{I}_4 (L - l) z|^2 \quad (12)$$

整理式(12)后可得一个以  $l$  为未知量的一元二次方程,对其进行求解,并选取数值介于0至故障区域长度之间的解即为测距结果。

由于本文只在集电线首末端配置测点,因此故障区域两端的电压电流并不一定都能够直接测得。鉴于前文已对风机支路负序电流进行估计,所以由集电线首端负序电压、电流与末端负序电压,结合风机支路负序电流,可从集电线首末端起逐段计算得到故障区域两端的电气量。图6中故障区域2-4首、末端负序电压、电流分别为

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 z_1 - (\dot{I}_1 - \dot{I}_w) z_2 - (\dot{I}_1 - 2\dot{I}_w) z_3 \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - 4\dot{I}_w \quad (14)$$

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_5 + \dot{I}_w z_{10} + 2\dot{I}_w z_9 \quad (15)$$

$$\dot{I}_4 = 4\dot{I}_w \quad (16)$$

式中,  $\dot{I}_w$  为前文所得风机支路负序电流。故障区域首端电气量均通过集电线首端测点所测电气量计算;故障区域末端电气量则由集电线某一末端测点的电气量计算,该末端测点可选为距离故障区域末端最近的测点,如式(15)和式(16)是由节点5处电气量所得。

因此,可得故障定位整体方案流程如图 7 所示。

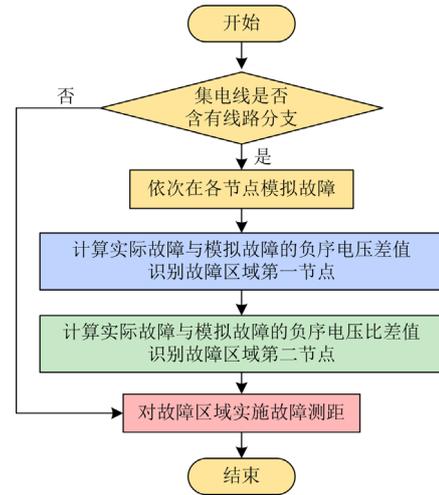


图 7 故障定位流程

Fig. 7 Flowchart of fault localization

## 4 仿真验证

参照国内某实际风电场拓扑,利用 PSCAD/

EMTDC 搭建如图 8 所示仿真模型。图中集电线 1 含有多个线路分支, 集电线 2 不含线路分支。由于对集电线 2 与集电线 1 的故障区域实施相同故障定位方法, 因此仅以集电线 1 为研究对象进行仿真验证。按照第 2 节所述, 集电线 1 可分为如图 8 中 7 个区域, 各区域长度如表 3 所示, 线路型号为 LGJ-240, 其对应线路参数如表 4 所示。集电线 1 上共连接 11 台双馈风机, 风机额定容量为 2 MW, 额定风速为 11 m/s, 风机支路上各箱变电压比为 35 kV/0.69 kV。

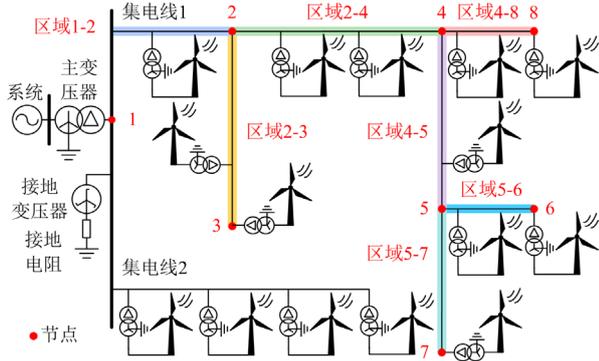


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

表 3 线路长度

Table 3 Line length

线路区域	长度/m
1-2	2126
2-3	1235
2-4	2272
4-5	822
5-6	835
5-7	310
4-8	2209

表 4 线路参数

Table 4 Line parameters

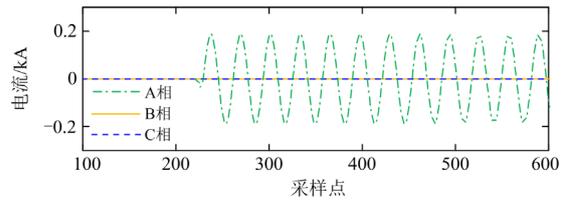
参数	正/负序	零序
电阻/( $\Omega$ /km)	0.1186	0.265
感抗/( $\Omega$ /km)	0.292	1.620
容抗/( $\Omega$ ·km)	$2.518 \times 10^5$	$7.267 \times 10^{-5}$

#### 4.1 故障定位过程分析

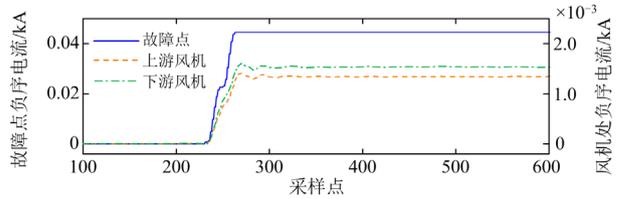
以集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处出现金属性 A 相接地、BC 相短路、BC 相接地为例进行分析, 本文故障距离均为故障点至母线的距离。故障时, 故障初相角为  $-30^\circ$ , 风机采用额定容量, 且都运行在额定风速下。各故障场景中故障支路及故障点上下游两台风机(距离母线最近与最远的风机)处的电流如图 9—图 11 的(a)、(b)所示; 应用本文故障定位方案所得相关信息如图 9(c)—图 11(c)所示,

从图中判断某节点是否为第二节点时所需电压比差值及其特征如表 5 所示。

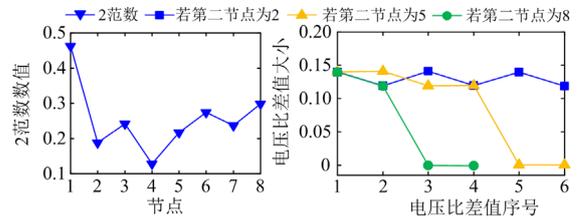
由图 9—图 11 中的(a)、(b)能够看到, 故障后故障点与各风机处的负序电流迅速增大; 比较故障点及其上下游风机处负序电流的大小可知, 各类不对称故障下, 故障点处的负序电流总远大于风机处, 且故障点上下游风机负序电流数值相近。由此验证了 2.1 节关于风机负序电流大小的分析, 进而证明了负序网络等效方式的合理性与近似取各风机电流相等这一处理方式的合理性。



(a) 故障点三相电流



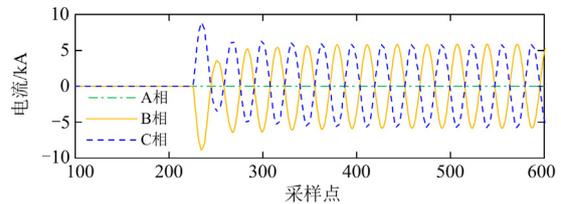
(b) 故障点与风机处负序电流



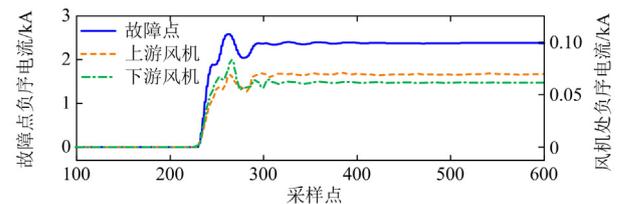
(c) 负序电压差值2范数与负序电压比差值

图 9 A 相接地时的故障信息

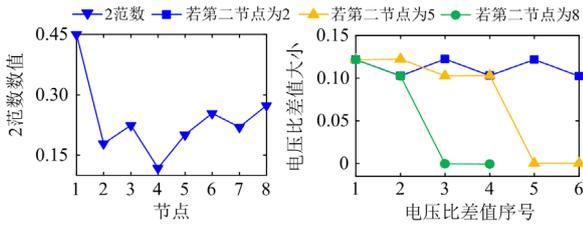
Fig. 9 Fault information of the phase-A-to-ground fault



(a) 故障点三相电流



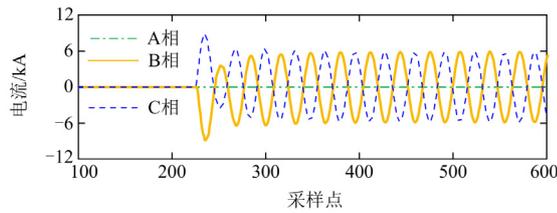
(b) 故障点与风机处负序电流



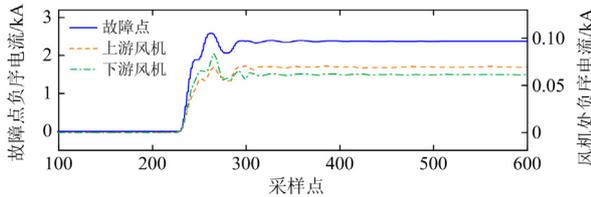
(c) 负序电压差值2范数与负序电压比差值

图 10 BC 相短路时的故障信息

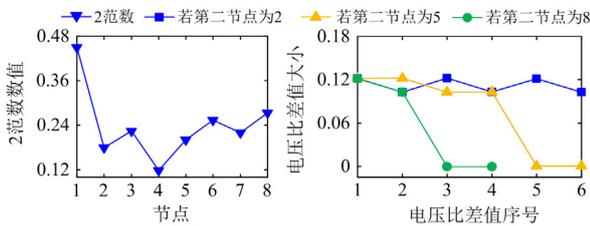
Fig. 10 Fault information of the phase-B-to-phase-C fault



(a) 故障点三相电流



(b) 故障点与风机处负序电流



(c) 负序电压差值2范数与负序电压比差值

图 11 BC 相接地时的故障信息

Fig. 11 Fault information of the phase-BC-to-ground fault

表 5 判断各节点是否为第二节点对应电压比差值判据

Table 5 Criterion of voltage ratio difference for determining whether certain node is the second node

序号	判断节点 2	判断节点 5	判断节点 8
1	$\Delta_{6_1} > 0$	$\Delta_{6_1} < 0$	$\Delta_{8_1} < 0$
2	$\Delta_{6_3} > 0$	$\Delta_{7_1} < 0$	$\Delta_{8_3} < 0$
3	$\Delta_{7_1} > 0$	$\Delta_{6_3} < 0$	$\Delta_{8_6} < 0$
4	$\Delta_{7_3} > 0$	$\Delta_{7_3} < 0$	$\Delta_{8_7} < 0$
5	$\Delta_{8_1} > 0$	$\Delta_{6_8} < 0$	—
6	$\Delta_{8_3} > 0$	$\Delta_{7_8} < 0$	—

进一步，应用所提定位方案进行定位。由图 9(c)—图 11(c)可知，各类故障总是能够在故障区域

2-4 的节点 4 处取得最小的负序电压差值 2 范数，同时，也只有在第二节点为 2 时各负序电压比差值完全与表 5 特征相匹配。以上结果表明，基于负序电压差值与电压比差值特征能够有效实现故障区域的识别。最终，A 相接地、BC 相短路、BC 相接地所得测距误差分别为 0.964%、0.833%、0.831%，各类故障得到准确定位。

#### 4.2 不同位置的不对称故障

分别在图 8 中集电线 1 的各个区域上设置 A 相接地(AN)、BC 相短路(BC)、BC 相接地(BCN)，具体故障位置如表 6 所示。各故障位置对应过渡电阻为  $0 \Omega$ ，故障初相角为  $-30^\circ$ ，风机采用额定容量，风速为额定值，所得定位结果如图 12 所示。

表 6 故障位置汇总

Table 6 Summary of fault locations

序号	区域	故障距离/m
1	1-2	1466
2	2-3	2426
3		2426
4	2-4	3323
5		4023
6	4-5	4920
7	5-6	5686
8	5-7	5430
9	4-8	5494
10	1-2	2116(靠近节点2)
11	2(节点处)	2126

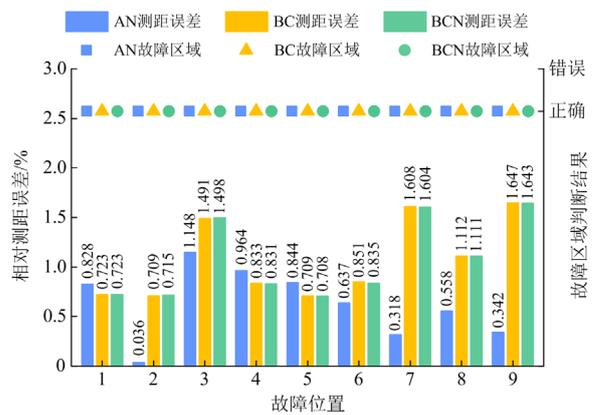


图 12 故障位置 1—9 的故障定位结果

Fig. 12 Fault localization results of fault location 1—9

由图 12 可知，对于故障位置 1—9，其对应故障区域都得到准确识别，并且故障测距误差最大仅为 1.647%，各故障点都实现准确定位。然而，故障位置 10 与 11 较为特殊，其对应各类故障的故障区域识别未能全部成功，如表 7 所示。实际上，故

障位置 10 距离节点 2 仅 10 m, 故障位置 11 即为节点 2, 由于上述位置非常接近线路分支引出点, 所提故障区域识别方法出现失效。此时, 按照所述故障区域识别失效处理策略, 在节点 2 附近查找故障即可成功定位。

表 7 故障位置 10、11 的故障区域识别结果  
Table 7 Identification results of faulty areas for fault location 10~11

故障位置	故障类型	第一节点	第二节点
10	AN	2	1、3
	AB	2	3、4
	ABN	2	1、3、4
11	AN	2	1
	AB	2	1、3、4
	ABN	2	1、3、4

综合所有故障位置的定位结果可知, 所提定位方案结合故障区域识别失效处理策略可以有效实现集电线上各处不对称故障的准确定位。

#### 4.3 不同过渡电阻下的不对称故障

在集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处模拟 A 相接地、BC 相短路、BC 相接地, 设置 0~500  $\Omega$  的过渡电阻, 验证过渡电阻对所提方案的影响。同时, 故障初相角设置为 $-30^\circ$ , 风机容量为 2 MW, 风速为额定风速。所得定位结果如图 13 所示。

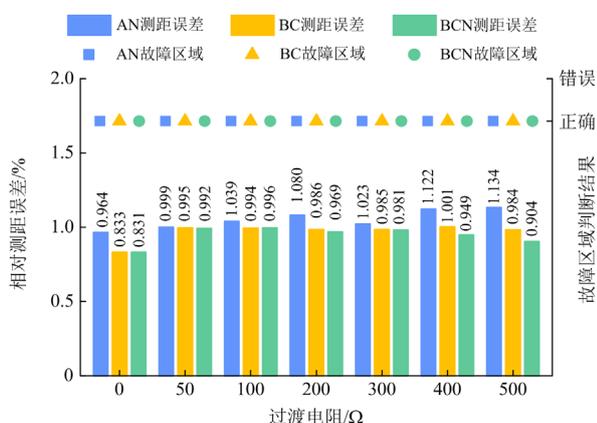


图 13 不同过渡电阻下的故障定位结果

Fig. 13 Fault localization results under different values of fault resistance

由图 13 可以看出, 在不同大小的过渡电阻下, 各类不对称故障的故障区域识别均正确, 且故障测距误差都较小。这主要是因为本文所提故障区域识别方法只是利用故障点电流进行故障模拟并比较模拟故障与实际故障的差异, 此过程不涉及过渡电阻大小, 且后续故障测距采用双端量实现, 也能够很

好地避免过渡电阻的影响。以上表明, 本文方案有着较好的抗过渡电阻能力。

#### 4.4 不同风机容量下的不对称故障

陆上风机的容量一般都在 5 MW 以内, 因此设置 1~5 MW 的风机容量, 验证不同风机容量下所提方案的性能。故障点为集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处, 故障类型为 A 相接地、BC 相短路、BC 相接地, 过渡电阻为 0  $\Omega$ , 故障初相角为 $-30^\circ$ , 风速为额定值。所得定位结果如图 14 所示。

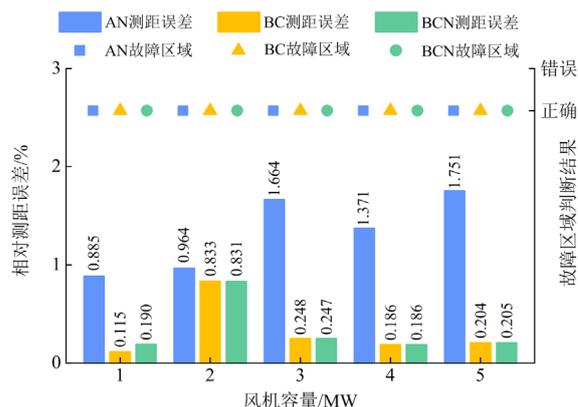


图 14 不同风机容量下的故障定位结果

Fig. 14 Fault localization results under different wind turbine capacities

由图 14 能看出, 对于 1~5 MW 的风机, 本文方案都能够正确判断出故障区域, 并实现准确的故障测距。这表明所提定位方法对于不同风机容量都有较好的适用性。进一步分析风机容量的影响可知, 风机阻抗会随风机容量的增大而减小, 容易使第 3 节所述负序网络等效方式的等效误差增大, 进而增大测距误差。同时, 风机支路故障电流也受风机容量影响, 但本文对风机电流进行了近似计算, 风机容量变化与近似计算误差的关系并不明确, 从而使近似计算误差所带来的测距误差与风机容量之间的关系存在不确定性。因此, 以上因素叠加后测距误差会随风机容量的变化出现一定波动, 但是波动趋势并不确定, 这一分析结论与图 14 测距结果相符。

#### 4.5 不同风速分布下的不对称故障

风电场不同位置的风速可能不同, 因此设置高低风速, 构成如图 15 所示 6 种风速场景, 分析风速分布对所提方案的影响。在集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处模拟金属性 A 相接地、BC 相短路、BC 相接地, 故障初相角为 $-30^\circ$ , 风机容量为 2 MW。所得定位结果如图 16 所示。由图 16 可知, 对于各种风速场景, 所提方案都能够准确地定位各类不对称故障, 测距误差都较小, 最大测距误差仅为

1.243%。原因在于，本文故障定位所利用的是作为故障分量的负序电压、电流，其大小取决于风电场负序网络，而风速影响风机的输出功率，负序网络的构成与风机功率变化无关，因此所提方案能够较好地克服风速分布的影响。图 16 中测距误差存在的较小波动主要来源于不同功率场景下序分量计算等计算误差的波动。

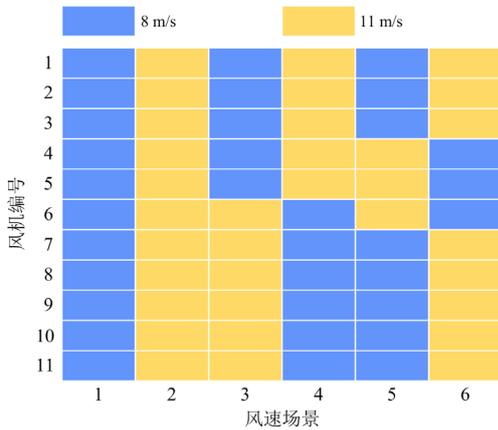


图 15 风速场景汇总

Fig. 15 Summary of wind speed scenarios

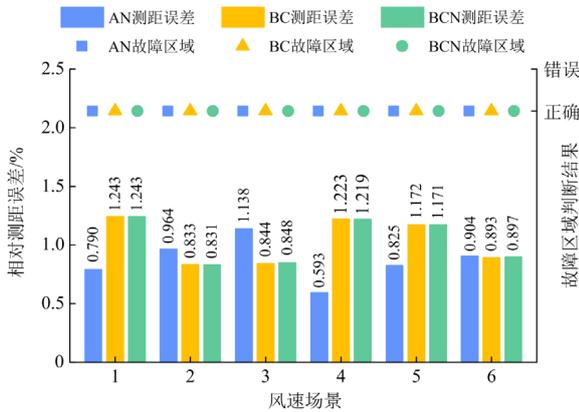


图 16 不同风速场景下的故障定位结果

Fig. 16 Fault localization results under different wind speed scenarios

#### 4.6 相量不同步对故障定位的影响

在集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处模拟故障初相角为 $-30^\circ$ 的 A 相接地、BC 相短路、BC 相接地，过渡电阻为  $0 \Omega$ ，风机容量为 2 MW，风速为额定值。以节点 1 为参考，分别在用于计算故障区域末端电气量的各测点设置不同步角。所得定位结果如图 17 所示。

从图 17 可以看到，虽然不同步角大小不同，但是各定位结果仍然较为精确。一方面，本文识别故障区域时并未涉及多点相量，因此识别结果与相量

同步情况完全无关。另一方面，测距公式虽然利用了双端相量，但是通过取模值平方较好地降低了方案对于相量同步的要求。以上表明，本文方案无需相量严格同步就能够有效定位各类不对称故障。

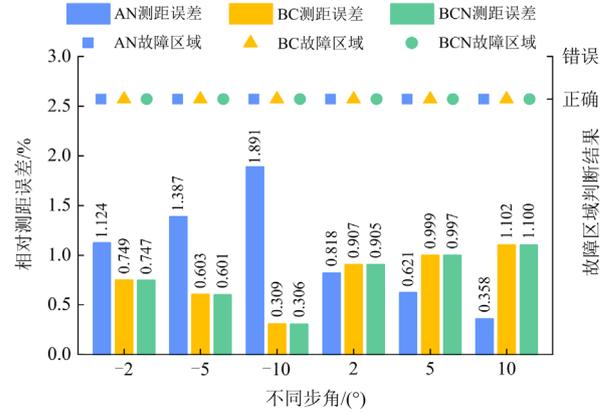


图 17 各种不同步角下的故障定位结果

Fig. 17 Fault localization results under different values of asynchronization angles

#### 4.7 方案对比

本文方案与文献[16]都是通过少量测点实施阻抗法集电线故障定位，为对比两方案性能，在集电线 1 区域 2-4 上故障距离 3323 m 处(故障位置 1)与区域 5-6 上故障距离 5786 m 处(故障位置 2)分别设置过渡电阻为  $0 \Omega$ 、 $50 \Omega$  的故障。由于文献[16]只能实现单相接地的故障定位，因此仅模拟 A 相接地。同时，故障初相角为 $-30^\circ$ ，风机容量为 2 MW，风速为 11 m/s，各方案所得测距结果如图 18 所示。

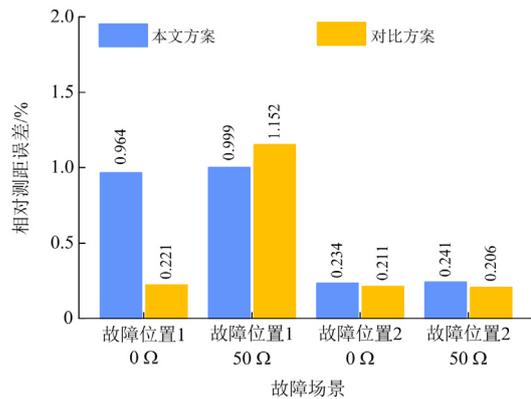


图 18 故障测距结果对比

Fig. 18 Comparison of fault distance calculation

由图 18 可知，本文方案与对比方案都能够以较高的精度实现故障距离的计算。但是，本文方案不仅能够完成单相接地故障定位，还能够实现两相短路、两相接地的故障定位，同时适用于含线路分支集电线，而对比方案只针对不含线路分支集电线的

单相接地故障提出。进一步,表8给出了两方案更为全面的对比情况。由表8可以看到,对比方案的优势在于测点数目少,而本文则是通过适当增加少量测点很好地扩大了方案的适用范围。因此,从综合性能来讲本文方案更优。

表8 方案对比

Table 8 Methods comparison

对比项	本文方案	对比方案
定位精度	高	高
含线路分支集电线适用性	适用	不适用
测点	集电线首末端	集电线首端
适用故障类型	不对称故障	单相接地

## 5 结论

针对风电场集电线不对称故障,本文提出一种基于双层负序差值与负序测距的故障定位方案,主要结论如下:

1) 计及风机电源特性,从负序角度出发能够建立稳定的双馈风机模型,进而结合风电场结构特征进行网络等效,可以有效构建适用于故障区域识别与故障测距的负序网络;

2) 采用故障模拟策略,基于负序电压差值能够有效表征模拟故障与实际故障的差异,从而可以准确识别出故障区域第一节点;

3) 分析表明,当第二节点不同时,从实际故障场景到特定模拟故障场景,节点负序电压存在不同的变化趋势,由此定义负序电压比差值,能够克服故障点电流大小影响,有效识别第二节点;

4) 基于负序差值的故障区域识别与负序测距相结合,可实现集电线上各类不对称故障的准确定位,且能够避免故障位置、过渡电阻、风机容量、风速分布、相量不同步等因素的影响;

5) 所提方案较好地计及了风机的影响,且仅需集电线首末端的少量测点,同时对于含/不含线路分支集电线均适用,较为全面地计及了风机影响、测点数目、线路分支等集电线定位关键问题。

## 参考文献

[1] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J].发电技术,2023,44(4):484-491.  
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.

[2] 奚鑫泽,邢超,覃日升,等.含双馈风力发电系统的配电网短路电流特性[J].上海交通大学学报,2023,57(7):921-927.  
XI Xinze, XING Chao, QIN Risheng, et al. Characteristics

of short-circuit current in distribution network with doubly-fed wind power system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(7): 921-927.

[3] 周原冰,杨方,余潇潇,等.中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J].中国电力,2022,55(5):1-11.  
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 1-11.

[4] 邓雯玲,卢继平,石家炜,等.基于双端非同步数据的混合线路故障测距方法[J].电网技术,2021,45(4):1574-1580.  
DENG Wenling, LU Jiping, SHI Jiawei, et al. A fault location method for hybrid lines based on two-terminal asynchronous data[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1574-1580.

[5] ZHANG T, YU H, ZENG P, et al. Single phase fault diagnosis and location in active distribution network using synchronized voltage measurement[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 117: 1-8.

[6] SABER A, BHALJA B R. Phasor-based fault location algorithm for three-end multi-section nonhomogeneous parallel transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 1-9.

[7] 黄飞,陈纪宇,戴健,等.基于特征暂态零模电流偏态系数的有源配电网单相故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(20):12-21.  
HUANG Fei, CHEN Jiyu, DAI Jian, et al. Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 12-21.

[8] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等.基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):140-147.  
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.

[9] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):179-185.  
LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2023, 38(2): 179-185.

[10] 曹璞璘,黄美琴,王云龙,等.交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):11-21.  
CAO Pulin, HUANG Meiqin, WANG Yunlong, et al.

- Electromagnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 11-21.
- [11] 陈皇熹, 方春华, 普子恒, 等. 基于 VMD-WVD 相位法的长电缆局放双端定位[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(3): 171-177.  
CHEN Huangxi, FANG Chunhua, PU Ziheng, et al. Double-ended positioning of partial discharge for long cable based on VMD-WVD phase method[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(3): 171-177.
- [12] 褚旭, 鲍泽宏, 许立强, 等. 基于时序卷积残差网络的主动配电系统线路短路故障诊断方案[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(8): 2178-2190.  
CHU Xu, BAO Zehong, XU Liqiang, et al. Fault line diagnosis scheme of active distribution system based on time-sequence convolution residual network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(8): 2178-2190.
- [13] LUO G, TAN Y, LI M, et al. Stacked auto-encoder-based fault location in distribution network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 28043-28053.
- [14] 张宸滔, 郑永康, 卢继平, 等. 基于图神经网络的智能变电站二次回路故障定位研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 81-90.  
ZHANG Chentao, ZHENG Yongkang, LU Jiping, et al. Fault location of secondary circuits in a smart substation based on a graph neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(11): 81-90.
- [15] JAMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 1-9.
- [16] 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.  
WANG Bin, REN Xuan. Single-line-to-ground fault location in wind farm collection line with neutral point grounding with resistor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2136-2144.
- [17] 彭华, 朱永利, 袁胜辉. 风电场集电线路单相接地故障组合测距[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 88-97.  
PENG Hua, ZHU Yongli, YUAN Shenghui. A combined fault location for single-phase grounding of wind farm collection line[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 88-97.
- [18] 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.  
ZHANG Ke, MA Changxiao, CAO Yanqing, et al. Fault location based on parameter estimation in hybrid transmission lines of wind farm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(8): 323-329.
- [19] 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.  
ZHANG Ke, ZHU Yongli, ZHENG Yanyan, et al. Fault location of single-phase earth in transmission lines of wind farm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(5): 114-120.
- [20] 朱永利, 彭华, 胡智强. 基于 VPMCD 的中性点经低阻接地风电场集电线路单相接地智能区段定位[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 1-8.  
ZHU Yongli, PENG Hua, HU Zhiqiang. Intelligent section location for single phase grounding fault of wind farm collection line with neutral point grounding via resistor based on VPMCD[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2022, 49(3): 1-8.
- [21] 彭华, 王文超, 朱永利, 等. 基于 LSTM 神经网络的风电场集电线路单相接地智能测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 60-66.  
PENG Hua, WANG Wenchao, ZHU Yongli, et al. An intelligent single-phase grounding fault location for a wind farm collection line based on an LSTM neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 60-66.
- [22] 黄涛, 陆于平, 王业. 考虑撬棒保护的 DFIG 等效序阻抗研究[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(9): 160-168.  
HUANG Tao, LU Yuping, WANG Ye. Study on equivalent sequence impedances of DFIG with crowbar protection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 160-168.
- [23] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8): 1-10.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8): 1-10.

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-02-03

作者简介:

丁嘉(1997—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力设备故障诊断; E-mail: jia\_ding\_0132@163.com

朱永利(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测和分析、电力系统分析与控制等。E-mail: yonglipw@163.com

(编辑 张颖)