

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.001

基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法

李永丽, 辛双乔, 李涛, 卢扬

(天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:风电场集电线路大多包含多个分支,且一般只在线路首端设置测量装置,若故障后基于该装置进行单端故障定位,则只能在不同分支上得到多个疑似故障点,无法确定实际故障位置。当前基于多端量的算法虽然能够准确定位故障,但需要增设的测量装置过多,成本过高。文中针对最常见的单相接地故障,分析了集电线路拓扑,指出当故障位于不同分支时,单端测量装置可能采集到相同的数据,因而仅依靠单端电气量无法确定故障分支,有必要增设测量装置以实现故障分支定位。为降低定位成本,在不同结构的线路上确定故障分支所需要增设的测量装置最小数量及位置。随后,结合新增测量信息与现有单端法,提出一种根据多端故障录波信息定位故障分支并实现故障测距的算法。最后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了文中方法的有效性和实用性。该算法改进自单端阻抗法,解决了故障分支定位问题,且在当前配置基础上增加少量测量装置即可实现,成本较低,具有较好的工程应用前景。

关键词:风电场;多分支线路;单相接地故障;故障定位;区段判定;阻抗测距

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)05-0002-10

0 引言

在“碳达峰,碳中和”的时代背景下,风力发电的地位日趋重要^[1]。随着风电渗透率的增加,对于风电承担常规电源辅助功能的需求也增加,包括频率调节和惯性响应等^[2],这对风电场的设备检测能力和数据分析能力提出了更高的要求^[3]。风电场所处自然环境一般较差,场内集电线路可能因线路金具损坏、绝缘污闪或雷击而发生单相接地故障^[4]。当前风电场一般在集电线路首端设有故障录波装置,能够在故障发生后记录各相电压、电流^[5],结合其配套软件能够实现基础的故障选相与故障定位功能^[6],但其算法未计及风电机组接入的影响^[7-8],误差很大。因此目前集电线路的故障定位仍依赖于人工巡线,费时费力,并导致大量风机长时间停机,造成供电可靠性下降^[9]。

根据故障定位所需信息的不同,可将故障定位算法分为单端法与多端法。在单端法方面,文献[10-11]根据风电机组单元变压器接线方式的特点,提出一种通过零序电流估算风机输出电流,进而根据单端信息与线路参数的关系求解故障距离的算法,但该算法未考虑实际的集电线路大多包含多个分支。若将上述算法直接应用于实际工程,则只能得到多个疑似故障点,而无法确定实际的故障位置。文献[12]使用大量故障数据进行机器学习,依靠人工智能算法寻找不同故障位置下电气量的

内在差异以进行故障定位,但可用于训练的实测故障数据不足,而使用仿真数据训练则难以保证定位的准确性,因此算法的可移植性与适应性差。文献[13]计算了不同故障位置下各测量点电气量的理论值,通过对比实际测量值与理论值的差异程度确定实际故障位置。但该方法要求每当风电场运行状态发生变化时就要重新计算理论值,运算量巨大,在实际工程中难以实现,且实现后也只能将故障定位至2台风机之间。

在多端法方面,文献[14]分析了故障点上游与下游的零序电流特性,提出在线路上安装多个零序电流测量装置,以将故障定位到2个测量装置之间的方案。但按照实际工程的定位需求,该方案需要在每条线路上加装十余个测量装置,经济性差。文献[15-16]将集电线路视为多个T型线路的组合,提出了利用T型线路三端同步信息进行故障定位与测距的方法,该方法要求线路两端与风机单元变压器高压侧均存在精度相同且时钟同步的测量装置,成本过高,在当前风电场中难以实现。

为解决上述问题,针对风电场内最常见的单相接地故障^[17],文中分析了多分支集电线路发生故障时,基于现有测量装置的单端量故障定位方法无法区分各分支故障的原因,即增设测量装置的必要性;之后,给出了故障分支定位所需的最小数量测量装置设置原则;在此基础上,提出一种结合多端同步故障录波信息与线路拓扑确定故障分支,并实现故障测距的方法;最后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了理论分析的正确性与算法的有效性。

收稿日期:2022-05-05;修回日期:2022-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2066210)

1 现有单端阻抗故障定位算法及其局限

图1为含有2个分支(TA、TB)的集电线路。其中O点为测量装置所在位置;T点为分支节点;Z_{ct}为风机与架空线之间的电缆、箱变等设备的等效阻抗;A点、B点为电缆与架空线连接的节点。设分支TA上发生单相接地故障,故障相为A相,过渡电阻为R_f。

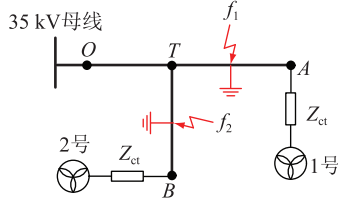


图1 两分支集电线路故障示意

Fig.1 Schematic diagram of fault on collector line with two branches

按文献[10]给出的单端阻抗法定位故障,即分别假设故障位于各区段,各自列出方程求解,并根据该解确定故障位置。若所得的故障位置位于假定的区段内,则认为解有效,由该解确定的故障点为实际故障点,否则解无效,转入其他区段的计算。

首先假定故障位于分支TA,记故障点为f₁,绘制图2所示复合序网图。图中,E_s为系统电动势;Z_s,Z_{s0}分别为系统正序与零序等值阻抗;z₁,z₀分别为单位长度集电线路正序与零序阻抗。由于风电场线路长度较短,故忽略对地电容的影响。Z_{DFIG1},Z_{DFIG2}分别为风机的正、负序等效阻抗^[18]。由于风机箱变一般采用YN,d接线方式,无法形成零序回路,因此零序网络不包含风机部分。l为各区段线路长度,i为各区段流过的电流,其角标对应区段的2个端点。U_k,i_k分别为故障点电压与电流,角标1、2、0分别对应正、负、零序,后续其他序分量以相同方式标明。设测量点O处故障相电压为E_o,电流为I_{or},易知I_{or0}=i_{k0},则有:

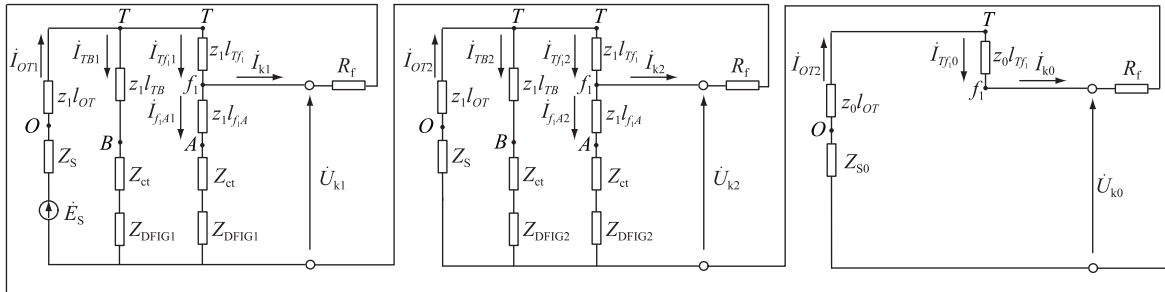


图2 故障发生时的集电线路序网络

Fig.2 Sequence networks of collector line when fault occurs

$$\begin{aligned} \dot{E}_o &= \dot{I}_{k0} [3R_f + z_0(l_{OT} + l_{Tf_1})] + \\ &(\dot{I}_{Tf_1} + \dot{I}_{Tf_2})z_1l_{Tf_1} + (\dot{I}_{OT1} + \dot{I}_{OT2})z_1l_{OT} \quad (1) \end{aligned}$$

E_o与I_{or}可由测量装置得到,对I_{Tf1}+I_{Tf2}有:

$$\dot{I}_{Tf_1} + \dot{I}_{Tf_2} = \dot{I}_{k1} + \dot{I}_{f_{A1}} + \dot{I}_{k2} + \dot{I}_{f_{A2}} \quad (2)$$

其中,I_{fA1}+I_{fA2}为1号风机提供的电流。由于缺少风机出口处的测量信息,可根据文献[11]给出的方式,考虑风电场的弱馈特性^[19],认为在测量点电流I_{or}中,故障电流I_f全部由系统侧提供,I_f=3i_{k0},其余电流由风机提供。故障期间,风机会根据故障程度不同而启动相应的低电压穿越策略^[20-21],因此风机输出电流会受到故障位置及故障严重程度的影响^[22-23],但考虑到同一集电线路上的风机型号相同,且出口处电压相近,因此可认为同一集电线路各风机提供的电流均相同,则有:

$$\dot{I}_{f_{A1}} + \dot{I}_{f_{A2}} = \frac{1}{2}(\dot{I}_{or} - 3\dot{I}_{k0}) \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)可得:

$$l_{Tf_1} = \frac{\dot{E}_o - \dot{I}_{k0}(3R_f + z_0l_{OT}) - (\dot{I}_{OT1} + \dot{I}_{OT2})z_1l_{OT}}{\left[\frac{1}{2}(\dot{I}_{or} - 3\dot{I}_{k0}) + \dot{I}_{k1} + \dot{I}_{k2} \right] z_1 + \dot{I}_{k0}z_0} \quad (4)$$

式中的未知量为R_f与l_{Tf1},将方程分解为实部与虚部即可得到方程组以求解故障点到分支节点的距离,进而确定故障点f₁的位置。

假定故障位于分支TB,记故障点为f₂,同理可绘制其复合序网图。序网图整体结构与图2一致,但f₁替换为f₂,A点、B点位置互换。同理有:

$$l_{Tf_2} = \frac{\dot{E}_o - \dot{I}_{k0}(3R_f + z_0l_{OT}) - (\dot{I}_{OT1} + \dot{I}_{OT2})z_1l_{OT}}{\left[\frac{1}{2}(\dot{I}_{or} - 3\dot{I}_{k0}) + \dot{I}_{k1} + \dot{I}_{k2} \right] z_1 + \dot{I}_{k0}z_0} \quad (5)$$

式中的未知量为R_f与l_{Tf2},采用前述方法求解可确定故障点f₂的位置。

式(4)与式(5)高度相似,可见,虽然实际故障点位于分支 TA ,但当分别假设故障位于分支 TA 或分支 TB 时,列出的 2 组方程可能分别得出有效解,即 2 个分支上各有一个可能的故障点。实际工程中无法确定其中的哪一个为实际故障点,只能将两者均记为疑似故障点。

观察式(4)与式(5)可以发现,式中的已知量除固定不变的线路参数外,还存在来自测量装置的测量值,即故障相电压 \dot{E}_o 、故障相电流 \dot{I}_{or} 与零序电流 \dot{I}_{k0} 。使用同一组测量值可能分别计算得到 2 个疑似故障点,换言之,当故障发生于不同分支时,测量装置可能得到相同的测量值。这就是仅依据线路首端数据进行计算会得到 2 个疑似故障点,而无法区分 2 种分支故障的原因。

2 基于多端信息的故障测距方法

根据前述分析可知,若增设若干处测量装置,使新增的装置在不同的故障情况下采集到的电气量不同,则可以此为基础确定实际的故障位置。出于成本方面的考虑,应增设尽可能少的测量装置。

2.1 故障分支定位原理

在图 1 所示线路中,若在 A 点增设测量装置,记 A 点故障相电压、电流分别为 \dot{U}_A 与 \dot{I}_A ,正、负、零序电压分别为 \dot{U}_{A1} , \dot{U}_{A2} , \dot{U}_{A0} ,则有:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \quad (6)$$

对于故障 f_1 ,有:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{f_1A1} + \dot{I}_{f_1A2} \quad (7)$$

可见,由于在 A 点增设了测量点,此处不再需要根据式(3)对风机输出电流进行估算,而是直接通过测量获得。

由于 A 点位于故障点下游,且风机箱变的特性使该点处无法形成零序回路,因此该点的零序电压与故障点相同,而零序电流为 0。根据图 2 可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_{k1} = \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{f_1A1}z_1l_{f_1A} \\ \dot{U}_{k2} = \dot{U}_{A2} + \dot{I}_{f_1A2}z_1l_{f_1A} \\ \dot{U}_{k0} = \dot{U}_{A0} \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6)得:

$$\dot{U}_A + \dot{I}_Az_1l_{f_1A} = 3\dot{I}_{k0}R_f \quad (9)$$

式中的未知量为 l_{f_1A} 与 R_f ,将方程拆分为实部与虚部即可列出方程组求解得到 l_{f_1A} ,进而求出 $l_{Tf_1} = l_{TA} - l_{f_1A}$ 。若此处得到的 l_{Tf_1} 与根据式(4)得到的 l_{Tf_1} 相同,则说明故障实际位于分支 TA ,所得故

障距离正确。

同理,对于故障 f_2 ,有:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{TA1} + \dot{I}_{TA2} \quad (10)$$

此时 A 点位于故障点上游,其零序电压与节点 T 相同,而零序电流为 0。可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_{k1} = \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{TA1}z_1l_{TA} - \dot{I}_{Tf_21}z_1l_{Tf_2} \\ \dot{U}_{k2} = \dot{U}_{A2} + \dot{I}_{TA2}z_1l_{TA} - \dot{I}_{Tf_22}z_1l_{Tf_2} \\ \dot{U}_{k0} = \dot{U}_{A0} - \dot{I}_{Tf_20}z_0l_{Tf_2} \end{cases} \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(6)得:

$$\dot{U}_A + \dot{I}_Az_1l_{TA} - \dot{I}_{Tf_21}z_1l_{Tf_2} + \dot{I}_{Tf_20}(z_1 - z_0)l_{Tf_2} = 3\dot{I}_{k0}R_f \quad (12)$$

其中:

$$\dot{I}_{Tf_2} = \dot{I}_{Tf_21} + \dot{I}_{Tf_22} + \dot{I}_{Tf_20} \quad (13)$$

与式(2)、式(3)同理,有:

$$\dot{I}_{Tf_2} = \frac{1}{2}(\dot{I}_{or} - 3\dot{I}_{k0}) + 3\dot{I}_{k0} \quad (14)$$

因此式(12)中的未知量为 l_{Tf_2} 与 R_f ,将方程拆分为实部与虚部即可列出方程组求解。若根据式(12)与式(5)得到的 l_{Tf_2} 相同,则说明故障实际位于分支 TB ,所得故障距离正确。

观察式(9)与式(12)可以发现,这 2 个方程使用了零序电流信息。 A 点位于故障点下游,无零序回路,则故障点处的零序电流信息只能从 O 点获得,因此 2 处装置的时钟需同步。实际工程中,由于测量精度以及同步问题,从 A 点计算的故障距离存在误差,但该计算结果仅用于确定故障分支,故障点位置仍从 O 点计算得,因而此误差可接受。

以上讨论均基于简单的两分支结构,下文结合实际风电场的线路结构,说明多分支线路中测量装置的具体增设方法。

2.2 最小数量的测量装置增设原则

图 3 为某风电场示意,其中详细展示了 1 号集电线路的拓扑,以此为例说明多分支线路定位单相接地故障所需增设测量装置的最小数量及其安装位置的确定方法。图 3 中风电场主升压变压器采用 YN,yn,d 型接线,低压侧引出中性点经电阻柜接地。实际工程中,风电场还有 YN,yn 型接线以及 YN,d 并通过 Z 型变压器引出低压侧中性点接地这 2 种接地方式。上述 3 种接地方式均属于有效接地,对后续分析过程无影响。

首先将图 3 中的 1 号集电线路转化为树型结构,如图 4 所示。

对树型结构中的节点作如下定义:

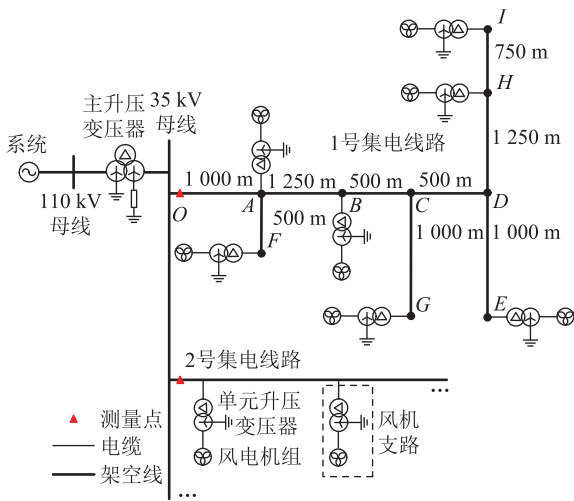


图3 风电场拓扑

Fig.3 Topology of wind farm

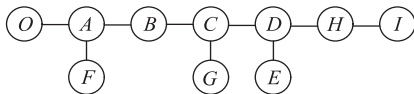


图4 集电线路的树型结构

Fig.4 The tree structure of collector line

(1) 根节点。树型结构最左端的节点称为根节点,在线路中对应线路首端已有测量装置所在位置,例如图4中的点O。

(2) 父节点与子节点。在一个节点右方或下方与其直接连接的节点称为该节点的子节点,该节点为子节点的父节点。例如图4中,点A为点O的子节点,点O为点A的父节点;点B、F为点A的子节点,点A为点B、F的父节点,依此类推。

(3) 兄弟节点。拥有相同父节点的节点称为兄弟节点,例如图4中,点B与点F为兄弟节点,点D与点G为兄弟节点,点H与点E为兄弟节点。

(4) 叶子节点。若一个节点没有子节点,则称该节点为一个叶子节点,例如图4中点F、G、E、I均为叶子节点。

在此基础上,给出测量装置的增设原则如下:

(1) 至少在与根节点间隔最多节点的一个叶子节点处增设测量装置;

(2) 若符合(1)的叶子节点有 $n(n \geq 2)$ 个兄弟节点,则应在其中的 $n - 1$ 个兄弟节点处增设测量装置;

(3) 若除符合(1)的叶子节点外的叶子节点有兄弟节点,则应在这些兄弟节点处增设测量装置。

结合实际工程中可能出现的线路拓扑,说明上述原则的应用方法:

(1) 多数情况下,只须按原则(1)增设一处测

量装置。例如在图3的1号集电线路中,应在I点增设测量装置。

(2) 少数情况下,在同一节点处存在2个以上分支。例如图5中,分支节点T处存在TA、TB、TC共3个分支,即在树型结构中,节点A有节点B、C这2个兄弟节点。

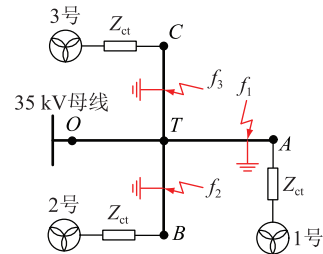


图5 同一节点存在3个分支的示意

Fig.5 Schematic diagram of three branches on the same node

此时,仅根据线路首端测量装置的信息进行故障定位,可能得到3个疑似故障点,即 f_1 、 f_2 与 f_3 。在A点增设测量装置后,仍将存在 f_2 与 f_3 这2个疑似故障点。此时必须在B点或C点再增设一处测量装置才能得到实际的故障位置。同理,若同一节点处存在更多分支,则每增加一个分支,就需要增设一个测量装置。

(3) 少数情况下,多个分支有子分支。例如图6中,分支TA有子分支AB、AC,同时分支TD有子分支DE、DF,即在树型结构中,除符合原则(1)的节点B外,节点E有兄弟节点F。

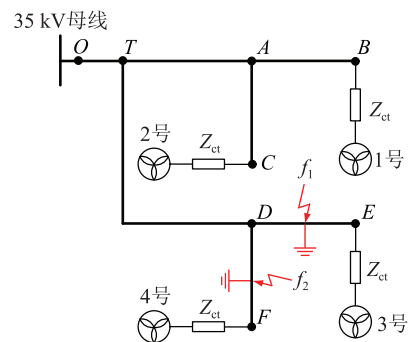


图6 多个分支有子分支的示意

Fig.6 Schematic diagram of multiple branches having sub-branches

此时,若仅在B点或C点增设一处测量装置,则对于分支DE与分支DF上发生的故障,根据2处测量装置的数据进行故障定位,仍会得到 f_1 与 f_2 这2个疑似故障点。此时必须在E点或F点处再增设一处测量装置才能得到实际的故障位置。

在根据上述原则增设测量装置后,即可根据多端信息进行故障分支定位。

2.3 故障测距算法在多分支线路中的应用

以图 3 所示线路为例,在 CG 、 DE 和 DH 上发生故障时,线路首端测量装置可能采集到相同电气量。沿用先前假设,即故障电流全部由系统侧提供,且各风机提供的电流均相同。记故障电流为 \dot{I}_f , 每台风机提供的电流为 \dot{I}_g , 3 种故障情况下的电流分布如图 7 所示。

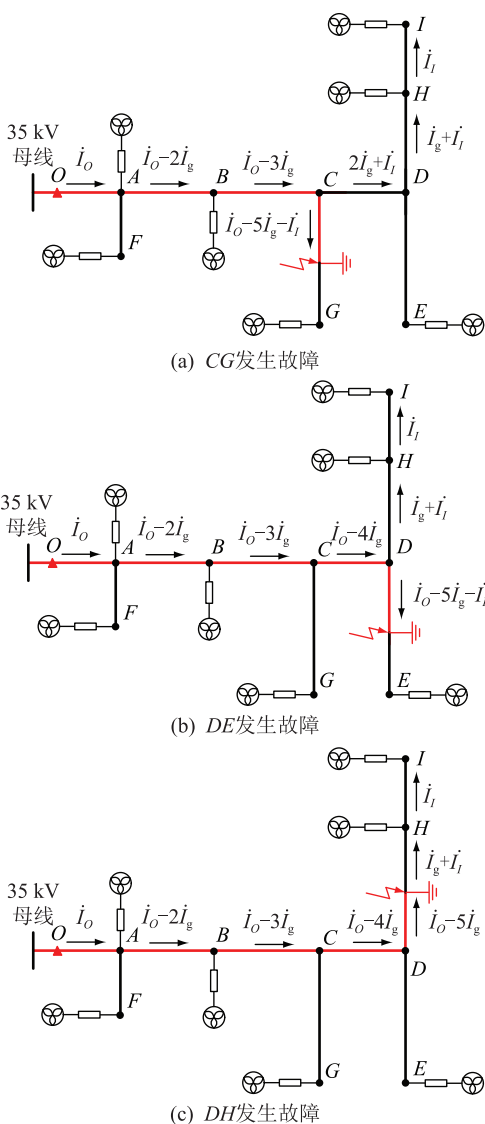


图 7 故障状态下多分支集电线路上的电流分布
Fig.7 Current distribution on multi-branches collector lines in fault state

O 点处已有测量装置,若在 I 点处增设测量装置,则可根据电流分布及上一节所述方法列出测距方程。例如,设 O 点处故障相电压、电流分别为 \dot{U}_0, \dot{I}_0 ; 零序电流为 \dot{I}_{00} ; I 点处故障相电压、电流分别为 \dot{U}_I, \dot{I}_I 。对于图 7(a) 所示情况,设故障点到 C 点距离为 l ,由于故障类型为单相接地故障,有:

$$\dot{I}_I = 3\dot{I}_{00} \quad (15)$$

考虑到 I 点处的风机电流可直接通过测量装置获得,将其输出电流 \dot{I}_g 替换为 \dot{I}_I , 根据式 (3) 可知其余 6 台风机输出电流为:

$$\dot{I}_g = \frac{1}{6}(\dot{I}_0 - 3\dot{I}_{00} - \dot{I}_I) \quad (16)$$

类似于式 (4) 与式 (9), 结合 2 个测量点的信息,有:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 = & (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{00})z_1l_{0A} + (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{00} - 2\dot{I}_g)z_1l_{AB} + \\ & (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{00} - 3\dot{I}_g)z_1l_{BC} + (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{00} - \\ & 5\dot{I}_g - \dot{I}_I)z_1l + 3\dot{I}_{00}R_f \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_I = & -\dot{I}_I z_1 l_{DH} - (\dot{I}_g + \dot{I}_I)z_1 l_{DH} - (2\dot{I}_g + \dot{I}_I)z_1 l_{CD} + \\ & (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{00} - 5\dot{I}_g - \dot{I}_I)z_1 l + 3\dot{I}_{00}R_f \quad (18) \end{aligned}$$

其中, K 为零序电流补偿系数:

$$K = (z_0 - z_1)/3z_1 \quad (19)$$

列出方程后,将 2 个方程均拆分为实部与虚部,分别求解 l 与 R_f 。若 2 组方程求出的 l 相同,则故障位于分支 CG , 故障点到 C 点距离为 l , 否则应转入其余 2 种情况的计算,计算方法同理。

图 7 也说明了原则 (1) 的必要性。若将测量装置设置于 I 点以外的其他位置,例如 G 点处,则对于图 7(b) 与 (c) 所示的 2 种情况,新增的测量装置仍会采集到相同的数据,进而产生疑似故障点。

考虑到风机输出电流为估算值等因素带来的误差,在实际故障点处,根据首端与末端测量值计算得到的故障距离仍会有一些差异,但该差异仍小于其他疑似故障点的首末端计算值差异。这是因为在实际故障点处,差异主要来源是估算风机电流等带来的误差;而对于其他疑似故障点,首末端计算值的差异来自于方程解的不合理,因为当计算无误差时,对于实际故障点,根据首端与末端电气量计算得到的故障位置重合,而对于其他疑似故障点,根据首端电气量确定其所在区段后,根据末端电气量计算得到的位置将位于该区段之外,或与疑似故障点有较大差异。具体分析如下:

首先考虑图 8 所示的 T 型线路结构。

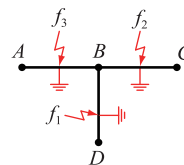


图 8 T 型线路故障测距示意

Fig.8 Schematic diagram of T-type line fault location

图中, $l_{AB} = l_{BC} = l_{BD} = 1$ km, $l_{Bf_1} = l_{Bf_2} = l_{Bf_3} = 0.5$ km, 其中 A 为线路首端, C 为线路末端, 首末端均设

有测量点, f_1 、 f_2 、 f_3 为疑似故障点位置。

设实际故障位置为 f_1 , 首先从 A 点测量故障距离, 可确定故障点到 A 点的距离为 1.5 km, 由此得到疑似故障点 f_1 与 f_2 , 可发现 f_1 与 f_2 分别位于 BD 与 BC 。然后从 C 点测量故障距离, 可确定故障点到 C 点的距离为 1.5 km。接下来, 分别尝试在 BD 与 BC 内搜索到 C 点距离为 1.5 km 的点。

在 BD 内可搜索到 f_1 , 即根据首末端数据计算得到的故障距离差异为 0 km。在 BC 内无法搜索到符合条件的点, 若尝试在其中求解符合条件的点到 B 点的距离, 将得到结果为 -0.5 km (即 f_1 或 f_3 到 B 点的距离), 为无效解, 此时根据首末端数据计算得到的故障距离差异为 1 km (即 f_2 到 f_1 或 f_3 的距离)。根据文中判据, 由于 $0 \text{ km} < 1 \text{ km}$, 故可确定实际故障位置为 f_1 。

接着考虑图 9 所示多端线路结构。设 $l_{AB} + l_{BF_1} = l_{AB} + l_{BC} + l_{CF_2} = l_1$, $l_{CD} + l_{CF_2} = l_{BC} + l_{CD} + l_{BF_1} = l_2$, 测量点位于 A 点与 D 点, f_1 、 f_2 、 f_3 为疑似故障点位置。

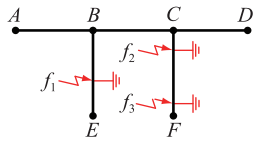


图 9 多端线路故障测距示意

Fig.9 Schematic diagram of multi-terminal line fault location

设实际故障位置为 f_1 , 首先从 A 点测量故障距离, 可确定故障点到 A 点的距离为 l_1 , 由此得到疑似故障点 f_1 与 f_2 , 可发现 f_1 与 f_2 分别位于 BE 与 CF 。然后从 D 点测量故障距离, 可确定故障点到 D 点距离为 l_2 。接下来, 分别尝试在 BE 与 CF 内搜索到 D 点距离为 l_2 的点。

在 BE 内可搜索到 f_1 , 即根据首末端数据计算得到的故障距离差异为 0。在 CF 可搜索到 f_3 , 此时根据首末端数据计算得到的故障距离差异为 $2l_{BC}$ (f_2 到 f_3 的距离)。根据文中判据, 由于 $0 < 2l_{BC}$, 故可确定实际故障位置为 f_1 。

若 $l_{BC} = 0$, 即 B 点与 C 点重合, 则变为图 5 所述情况, 此时必须增加测量装置以完成分支定位。

实际应用中可以此为判据确定实际故障位置。设测量装置总数为 n , 疑似故障点总数为 m , 假定故障位于第 k 个疑似故障点时, 根据第 i 个测量装置的数据计算得到的故障距离为 l_{ki} , 设对第 k 个疑似故障点有:

$$f_{kd} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (l_{ki} - l_{kj})^2} \quad (20)$$

则实际故障位置的判据为:

$$f_{rd} = \min(f_{1d}, f_{2d}, \dots, f_{md}) \quad (21)$$

式中: r 为实际故障点的编号。

2.4 多分支集电线路故障测距流程

结合前述测距原理, 可得出多分支集电线路故障测距流程如图 10 所示, 具体步骤如下。

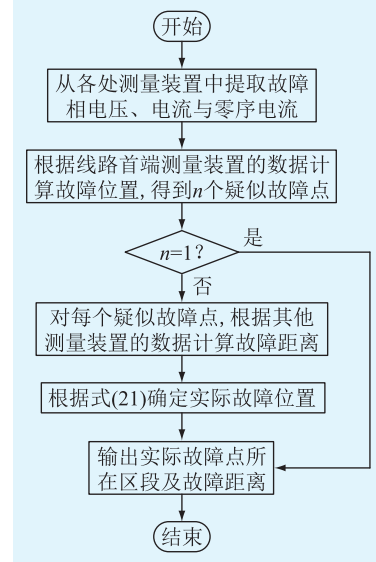


图 10 故障测距流程

Fig.10 Fault location process

第一步: 根据线路各端的测量装置传回的信息确认故障相, 并提取各端的故障相电压、电流及首端零序电流。

第二步: 依次假定故障位于各区段, 基于线路首端电气量与线路参数列方程求解, 将有效解标记为疑似故障点。

第三步: 依次假定故障位于各疑似故障点所在区段, 基于其他端电气量及首端零序电流信息与线路参数列方程求解故障点位置。全部求解完成后, 根据式(20)判断实际故障位置。

实际工程中一般使用傅里叶变换得到故障相电压相量及电流相量以进行计算。由于风机在故障期间启用低电压穿越策略, 导致输出的电流偏离工频, 所以应用傅里叶变换得到的工频量有波动^[24]。为使测距结果更加准确, 可取 1~2 个周波的数据进行计算, 并求取平均值作为测距结果。考虑到非工频量随时间衰减的特性^[25], 可取故障切除前 1~2 个周波的数据进行计算。

3 仿真实验

分别按照图 3、图 5 与图 6 所示的风电场集电线路结构, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型。架空线型号为 LGJ-240/55, 连接风机与箱变的电缆型

号为 YJY22—0.6/1 3×240,连接箱变与架空线的电缆型号为 YJY—26/35 3×70。风机类型为双馈异步风机,额定电压为 0.69 kV,额定功率为 2.5 MW,定子侧阻抗为 $0.0054 + j0.1$ p.u.,转子侧阻抗为 $0.00607 + j0.11$ p.u.,励磁电抗为 $j4.5$ p.u.。箱变变比为 0.69 kV/35 kV,对应漏抗为 0.06 p.u.。风电场接地阻抗为 50.5 Ω。测量装置的采样周期为 100 μs,测量误差不超过 3%,测量结果保留 5 位有效数字。图 3 中各区段长度参考图中标注,图 5 与图 6 中各区段长度均为 1 km。

3.1 不同故障位置下的故障测距结果

分别在线路上的不同位置设置单相金属性接地故障,过渡电阻设为 0.001 Ω,故障相为 A 相。3 条线路对应的测距结果分别如表 1—表 3 所示。

表 1 图 3 所示线路的故障测距结果

Table 1 Fault locating results of lines showed in Fig.3

故障分支	故障距离/km	定位结果	测距结果/km	相对误差/%
CG	3.450	CG	3.445	0.14
CG	3.650	CG	3.644	0.16
DE	3.450	DE	3.445	0.14
DE	3.650	DE	3.645	0.14
DH	3.450	DH	3.445	0.14
DH	3.650	DH	3.644	0.16

表 2 图 5 所示线路的故障测距结果

Table 2 Fault locating results of lines showed in Fig.5

故障分支	故障距离/km	定位结果	测距结果/km	相对误差/%
TA	1.50	TA	1.51	0.67
TB	1.50	TB	1.51	0.67
TC	1.50	TC	1.51	0.67

表 3 图 6 所示线路的故障测距结果

Table 3 Fault locating results of lines showed in Fig.6

故障分支	故障距离/km	定位结果	测距结果/km	相对误差/%
DE	2.50	DE	2.51	0.40
DF	2.50	DF	2.51	0.40

表 1 为图 3 所示线路中出现图 7 所示 3 个疑似故障点的情况下,通过文中方法判断故障分支的结果。同理,表 2 与表 3 分别对应图 5 与图 6 所示的存在多个疑似故障点的情况。从结果可以看出,在各种结构的线路上出现多个疑似故障点时,文中方法都能够正确判断故障分支并实现故障测距。其中,表 1 中第一行与第三行对应的故障情况下,线路首端与末端的测量装置采集到的电流与电压波形分别如图 11(a)、(b)所示,图例中的 CG 与 DE 代表故障所在区段,O 与 I 分别对应从首端 O 点和末端 I 点采集的数据。可以看出,在 2 种故障情况下,线路

首端的电压、电流及线路末端电流均基本一致,但线路末端电压有较大差异,这也是文中方法增设测量点确定故障分支的基础。

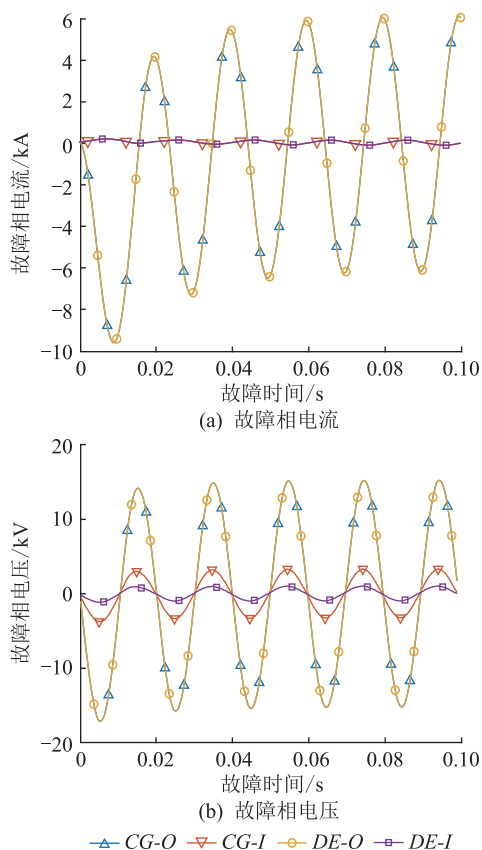


图 11 2 种故障情况下各测量点电气量波形

Fig.11 The waveforms of electrical variables from measuring devices under two fault conditions

不同算法在 3 种线路中完成故障定位所需的测量装置数量如表 4 所示。可以看出,文中算法所需测量装置数量少,经济性较好,且线路结构越复杂,该优势越明显。

表 4 故障定位所需测量装置数量

Table 4 Number of measuring devices required for fault locating

线路	文中方法	文献[10]方法	文献[11]方法
图 3	2	18	8
图 5	3	8	4
图 6	3	14	5

3.2 不同过渡电阻下的故障测距结果

对图 3 所示线路,在分支 AB 设置单相接地故障,故障相为 A 相,故障点到线路首端 O 点的距离为 1.25 km,此时情况类似于图 1,分支 AF 上将出现疑似故障点。分别为故障设置不同大小的过渡电阻,测距结果如表 5 所示。

可以看到,在高阻情况下,文中方法仍能正确判断故障分支,测距结果也能保持较高的精度。而

表5 不同过渡电阻下故障分支
判断结果及故障测距结果

Table 5 Fault branch judgment results and fault locating results under different fault resistances

过渡电阻/ Ω	故障分支	故障距离/km	定位结果	测距结果/km	相对误差/%
0.01	AB	1.250	AB	1.248	0.16
0.1	AB	1.250	AB	1.248	0.16
1	AB	1.250	AB	1.250	0
10	AB	1.250	AB	1.250	0
100	AB	1.250	AB	1.253	0.24
200	AB	1.250	AB	1.235	1.20
300	AB	1.250	AB	1.246	0.32

当过渡电阻过高时,故障录波装置无法正常启动,无法获取所需信息,此情况不属于文中算法的适用范围。

表5第一行对应的故障情况下,各风机接入点电压和各箱变高压侧电流分别见图12、图13。

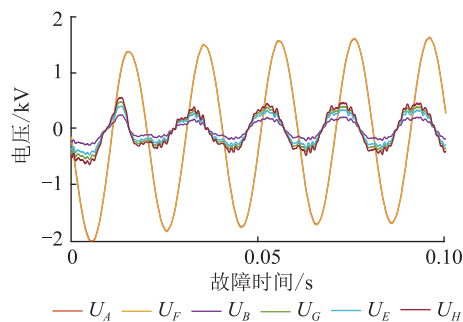


图12 风机接入点电压波形

Fig.12 Voltage waveforms at wind turbine access points

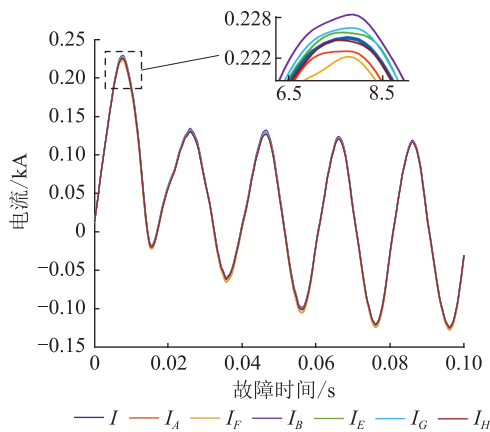


图13 箱变高压侧电流波形

Fig.13 Current waveforms of high-voltage side of box-type transformer

图12中, U_A 代表A点电压,其余波形同理对应各风机接入点电压。可以看到,各点电压虽在绝对数值上有较明显差异,但相对数值均为额定电压(35 kV)的1%~3%,故可认为风机出口处电压相近,或称其处于程度相似的电压跌落条件下。图13

中, I 为估算的电流波形, I_A 为连接至A点的风机箱变高压侧电流,即通过电缆与箱变连接至A点的风机对集电线路输出的电流,其余波形同理对应各风机输出电流。可以看出,各波形基本重合,即按平均分配的方式估算风机输出电流,其误差在可接受范围内。

3.3 考虑测量误差时的故障测距结果

为校验存在测量误差时的故障定位性能,对表1中第一行与第三行对应的故障情况,在仿真数据中加入最大3%的误差并应用文中方法定位故障,结果如表6所示。表6中,“随机”表示各采样点的误差为-3%~3%之间的随机数。可以看到,在存在测量误差的情况下,文中算法仍能正确判断故障分支并保持较高测距精度。

表6 存在测量误差时的测距结果

Table 6 Fault locating results with measurement error

故障分支	故障距离/km	测量误差	定位结果	测距结果/km	相对误差/%
CG	3.450	+3%	CG	3.445	0.14
CG	3.450	-3%	CG	3.445	0.14
CG	3.450	随机1	CG	3.454	0.12
CG	3.450	随机2	CG	3.441	0.26
DE	3.450	+3%	DE	3.445	0.14
DE	3.450	-3%	DE	3.445	0.14
DE	3.450	随机1	DE	3.437	0.38
DE	3.450	随机2	DE	3.443	0.20

4 结论

文中针对现有算法在含分支的风电场集电线路路上无法准确定位单相接地故障的问题,研究了基于多端信息和线路拓扑的故障定位与测距方法,主要结论如下:

(1) 提出了多分支线路定位单相接地故障所需的最小数量测量装置增设方法,消除了现有单端量测距算法的疑似故障点,且相较于现有多端量测距算法成本更低。

(2) 提出了基于多端同步数据与线路拓扑的多分支集电线路单相接地故障定位方法,所提方法在各种结构的线路上均能准确地完成故障分支定位与故障测距,且具有一定的抗过渡电阻能力。

参考文献:

- [1] 宋怡,林晨韵,梁高琪,等. 基于电力现货市场仿真的海上风电接入对广东省电力行业碳排放影响评估[J]. 全球能源互联网,2020,3(4):363-373.
SONG Yi, LIN Chenyun, LIANG Gaoqi, et al. Assessing the impacts of large-scale offshore wind power integration on carbon e-

- mission reduction in Guangdong province based on electricity spot market simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4):363-373.
- [2] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25):4304-4314.
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25):4304-4314.
- [3] 柴树飞, 张益菲, 马驰, 等. 智慧风电场发展方向探索[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(5):1-4.
CHAI Shufei, ZHANG Yifei, MA Chi, et al. Exploration of the development direction of smart wind farm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(5):1-4.
- [4] 孙德娟. 双馈风电机组短路电流特性及其对送出变保护性能的影响[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
SUN Dejuan. Short-circuit current characteristics of doubly-fed wind turbines and its influence on protection performance of transmission transformer[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [5] 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.
ZHANG Ke, SUN Lizhi, ZHU Yongli, et al. Fault location method of wind farm collection line based on vector deviation degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):127-133.
- [6] 逯遥. 风电场集电线路自适应继电保护技术研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
LU Yao. Research on adaptive relay protection technology of collecting line in wind farm[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [7] FURSE C M, KAFAL M, RAZZAGHI R, et al. Fault diagnosis for electrical systems and power networks: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2):888-906.
- [8] 张悛宁. 架空-电缆混合输电线路故障定位方法综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6):44-51.
ZHANG Yining. A review of fault location methods for hybrid overhead and cable transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6):44-51.
- [9] 高钰莹. 大规模风电场集电线和送出线故障选线与测距新方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
GAO Yuying. Research on a new method of fault line selection and location for collecting and sending lines of large-scale wind farm[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [10] 潘文庆. 风电场零序保护及其场内单相接地故障测距技术研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
PAN Wenqing. Study on the zero sequence protection of wind farm and its single-phase ground fault location[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [11] 王宾, 任莹. 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.
- [12] 彭华, 朱永利. 基于apFFT频谱校正和XGBoost的风电场集电线路单相接地故障测距[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23):4931-4939.
PENG Hua, ZHU Yongli. Singlephase grounding fault location for power lines of wind farm based on apFFT spectrum correction and XGBoost algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23):4931-4939.
- [13] 张科. 大型风电场输电线路短路故障测距方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
ZHANG Ke. Study on short-circuit fault location method for transmission lines of large-scale wind farms[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [14] 郑艳艳, 朱永利, 刘童童, 等. 基于零序电流的风电场单相接地故障区段定位[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7):1408-1415.
ZHENG Yanyan, ZHU Yongli, LIU Tongtong, et al. Single-phase grounding fault location in wind farm based on zero-sequence current[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7):1408-1415.
- [15] 李笑夫. 含风电的多端输电线路故障测距技术的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017.
LI Xiaofu. Research on fault location technology of multi-terminal transmission line with wind power[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [16] 刘瑞麟. 基于序分量的多端线路精确故障定位研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018.
LIU Ruilin. Research on accurate fault location for multi-terminal transmission lines based on sequence components[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [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. Combined fault location for single-phase grounding of wind farm collection line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9):88-97.
- [18] 沈枢, 张沛超, 方陈, 等. 双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15):87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15):87-92.
- [19] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 考虑风力发电的配电网弱馈线路自适应电流保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3):65-73.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. An adaptive current protection for weak-infeed distribution lines with wind generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3):65-73.

- [20] 王晨清,宋国兵,迟永宁,等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):52-58.
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):52-58.
- [21] CARDENAS R, PENA R, ALEPUZ S, et al. Overview of control systems for the operation of DFigs in wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7):2776-2798.
- [22] 王所钺. 基于双馈风电机组的短路电流计算方法[D]. 济南:山东大学,2015.
WANG Suoyue. Short-circuit current calculation method based on doubly-fed induction generator[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [23] HU Q H, ZHANG R J, ZHOU Y C. Transfer learning for short-term wind speed prediction with deep neural networks[J]. Renewable Energy, 2016, 85:83-95.
- [24] 张保会,王进,郝治国,等. 风电接入对继电保护的影响(三):风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):1-8.
ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):1-8.
- [25] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六):风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):1-6.

作者简介:



李永丽

李永丽(1963),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: lytju@163.com);

辛双乔(1997),男,硕士,研究方向为电力系统保护与控制;

李涛(1992),男,博士在读,研究方向为电力系统保护与控制。

Single phase grounding fault location algorithm of wind farm collector lines based on multi-terminal information

LI Yongli, XIN Shuangqiao, LI Tao, LU Yang

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Collector lines in wind farms mostly contain multiple branches, and generally only one measuring device is set at the head of the line. If single-end fault locating is carried out based on the device after a fault, only multiple suspected fault points can be obtained on different branches, and the actual fault branch cannot be determined. Although the current multi-terminal algorithm can locate the fault branch, the number of measuring devices required is too much, which is expensive. In this paper, the topological structure of a collector line is analyzed under the most common single-phase grounding fault. It is pointed out that when faults occur on different branches, the same data may be collected by the single-end measuring device, making the fault branch cannot be identified only by the single-end electrical volume, so it is necessary to add measuring devices to identify the fault branch. In order to reduce the investment, the minimum number and location of additional measuring devices required to identify the fault branch on lines with different topologies are determined. Combined with the new measurement information and the existing single-terminal method, an algorithm is proposed to locate the fault branch and achieve fault location based on multi-terminal fault recording information. The effectiveness and practicability of the proposed method are verified by PSCAD/EMTDC simulation. The proposed algorithm is improved from the single-terminal impedance method to solve the problem of fault branch location, and it can be realized by adding a few measuring devices on the basis of the current configuration. The cost is low, which means a good engineering application prospect.

Keywords: wind farm; multi-branches line; single phase grounding fault; fault location; section determination; impedance location

(编辑 方晶)