

[风电]

基于多端信息融合的风电场集电线路故障精确定位研究

文/张丕华
大唐云南发电有限公司

分析了现有的集电线路监测手段存在的弊端，提出了一种基于多端信息融合的风电场集电线路故障精确定位方法，综合考虑集电线路运行特性及经济特性，设计了多T接集电线路的多端测距终端合理的安装数量以及位置，结合多端信息融合的集电线路故障测距算法，实现了集电线路科学有效的故障点精确定位。

近年来我国大力发展风电、光伏等清洁能源，以保证实现“双碳”目标。由于风力发电选址方便、安装位置灵活且具备成熟的应用技术及较高的商业价值而深受青睐。我国风力发电技术相对欧洲发达国家起步较晚，无论是技术方面还是硬件制造都具有较大的差距，经过多年的努力，我国风力发电技术得到了较大的发展。截至2022年末，我国风力发电无论是发电量还是并网风电场数量皆为世界第一，同时相应的风力发电技术以及生产技术都得到了极大提升。伴随着风力发电的大力发展，风电场线路并网问题成为重中之重。由于风电场集电线路采用中性点非有效接地方式运行，系统允许带故障运行，而集电线路带故障运行容易诱发非故障相别产生过电压，进而导致线路发生故障跳闸，在带故障运行的故障中，如果能实现故障点清除即可保证风电场集电线路的稳定运行，在线路发生单相接地故障时，如果没有实现故障点的排除，小面积的容易导致风电场集电线路出现奔风窝电的情况，严重情况下，可能出现频率偏移、大面积风电场脱网事故，因此风电场集电线路单相接地故障的快速处理可实现电网线路的稳定生产。

考虑到风电场集电线路的运行特性，一部分学者通过等效阻抗的方式进行了风电场集电线路的故

障测距，对风电场集电线路首先进行T接点单元形式划分，在风电场集电线路各个主要的部位进行关键电气量测量，一般监测点位于集电线路升压站出口、T接线出口，当系统发生故障时，通过等效阻抗的形式进行各个关键部位的电气量测量计算，从而逐步推算故障点，该方案基本可实现集电线路的故障点精确定位，其故障测距精度受到故障等效网络以及故障点所在位置影响较大，无法保证故障测距精确性。

另一方面，一部分学者从行波故障测距的角度对风电场集电线路故障测距进行分析，受到风电场集电线路的电缆架空混架结构以及多T接短分支特性的影响，基于行波的集电线路故障测距需要较多的故障监测装置以及合理的安装点位置，才能实现集电线路的全线故障点精确定位，同时受到风电场集电线路的分布式电源特性以及故障点多变性的影响，可能导致无法进行故障区间的准确判定。

本文从集电线路敷设方式以及运行方式着手，分析了集电线路单相接地故障时等效序网络，进行了集电线路的故障区间判定，优化了集电线路监测终端安装点位置以及终端个数，最终实现了风电场集电线路单相接地故障的故障点精确定位。

集电线路运行模式

1. 双馈式风力发电机

我国国土面积辽阔，各区域地势地貌鲜明，尤其是华东、华北和西北区域，该区域内海拔高度适中，这是我国风电场集电线路发展的先天性优势。我国现阶段新建的风电场发电厂其风机大部分采用双馈式风力发电机（DFIG），主要组成为扇叶、齿轮箱、双馈式风力发电机、保护电路和并网系统，其等效示意图如图1所示。

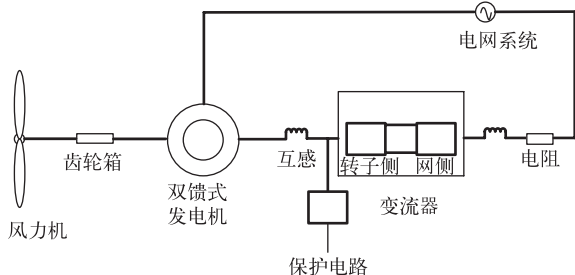


图1 DFIG系统示意图

作为风力发电中的重要组成部分，DFIG风力发电技术得到了大力的发展，由传统的笼型发电机逐渐转变成现阶段的DFIG型发电机。另一个作为风电发电系统的重要组成部分为风电场集电线路。

2. 风电场集电线路

风力发电重要的组成一部分为风力发电机，另一部分为风电场集电线路。集电线路大部分分布在山脊或者入风口处，受到风机的分布以及地势地形的影响较大，整体上来讲风电场集电线路结构为多分支，短T接的特性，集电线路中T接大量风机，同时受到区域性或者建筑的影响，风电场集电线路中存在大量的电缆T接混架的情况，同时含有多个馈线，如图2所示。

线路中风机基本为DFIG风机，其接线方式采用Y形接线，风力发电机产生的电力，通过短电缆线接入到集电线路中，由于其运行方式的影响，集电线路基本采用三角形接地方式运行，集电线路将风力发电机产生的电力传输至升压站。图2中的每回集电线路只含有1段电缆线路，而实际风电场中，线路往往含有多段电缆线路。同时其线路中基本上存在多个T接节点，支路上存在多个支路的结构，总体呈现辐射状结构，集电线路故障测距带来了极大的困难。同时，部分集电线路中升压站35 kV母线上存在Z型变压器。风力发电作为清洁能源的重

要组成部分，现阶段，风电场的并网数量极高，因此风电场集电线路的稳定性直接关系到电网的安全稳定生产。而风电场集电线路由于其可以带故障运行，基于此运行方式以及线路结构，风电场集电线路单相接地故障监测以及故障处理成为保障线路稳定运行的重中之重。

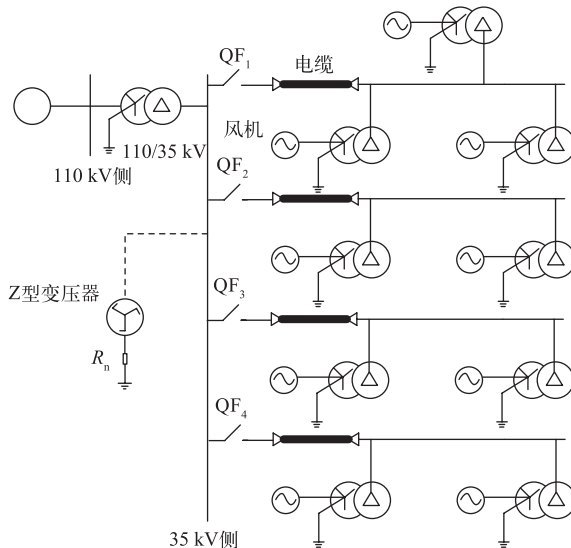


图2 风电场等效示意图

集电线路单相接地发展规律及测距方法

单个风电场中往往含有大量的馈线，每条馈线中含有大量的风机，馈线利用风机产生的电能进行稳定输出给主网线路，从而实现电能的传输。在研究集电线路单相接地故障时，以单根馈线为例，线路为分布式电源结构，采用中性点非有效接地的方式运行。以图2中任意一根馈线发生故障为例，其故障等效结构如图3所示。

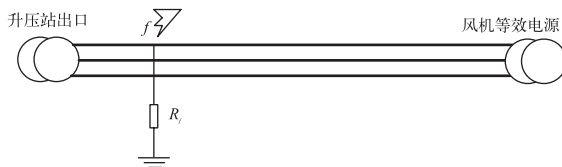


图3 集电线路单相接地故障等效示意图

单个风电场中往往含有大量的馈线，在进行风电场集电线路单相接地故障分析时，以单回路馈线出线为例，如图3所示为等效的单回路馈线单相接地示意图，其中 f 为单相接地故障点， R_f 为单相接地过渡阻抗。将所有风机等效成单个电源模式，外加升压站出口为单个电源，由于系统为中心点非有效

接地方式运行,以图3为例,假设该系统发生单相接地相别为A相,则系统的电压变化如图4所示。

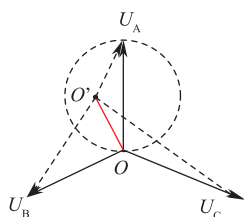


图4 单相接地故障系统电压变化情况示意图

图4为该集电线路单根馈线发生单相接地故障时,A、B、C三相相电压的变化情况,系统为非有效接地方式运行,原始中心点为 O ,在系统发生故

障前其相电压为 OU_A 、 OU_B 、 OU_C ,在系统发生故障后,其中心点由 O 变化为 O' ,则系统中对应的电压变化为 $O'U_A$ 、 $O'U_B$ 、 $O'U_C$,以上量均为矢量。通过矢量运算可知,故障相A相电压展现出明显的变小的情况,而非故障相电压B、C两相明显表现出变大的情况。

在进行系统的电流变化计算时,需要通过对单根导线进行序网络分解。通过分析可知,该系统存在系统接地的情况,因此该系统存在正序、负序和零序网络,将图3中系统进行等效为如图5所示的序网络。

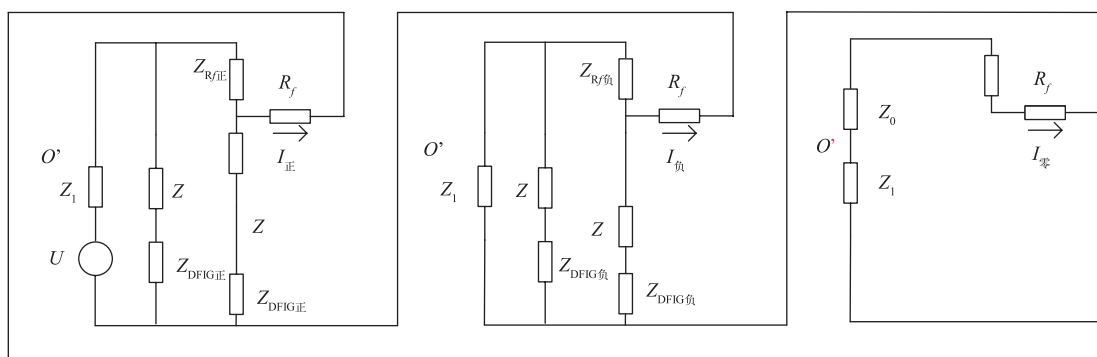


图5 单相接地等效图

图5为该系统发生单相接地时,故障等效序网络,其 O' 为中性点发生偏移之后的新中性点, U 为系统发生单相接地时,等效故障电源, Z_1 为新中性点系统阻抗, Z 为变化前阻抗, $Z_{DFIG正}$ 为风电场集电线路所有风机提供的正序阻抗之和, $Z_{DFIG负}$ 为风电场集电线路所有风机提供的负序阻抗之和, $Z_{R/正}$ 为系统单相接地故障点前阻抗, Z_0 为系统故障后零序等效阻抗, R_f 为系统发生单相接地故障时,系统过渡阻抗。等效序网络可知经过故障点的故障电流计

算难度相当高,该等效序网络为系统存在接地的情况下,针对不同类型的故障,系统需要对序网络做出区分,从而实现接地点的精确计算。

对现有的集电线路进行单相接地故障测距时,首先需考虑T接线路不同情况下的等效,由于系统为单相接地故障,因此需要对各种不同情况下的T接进行等效,常规情况下将现有的集电线路等效成如图6所示的3种T接线路。

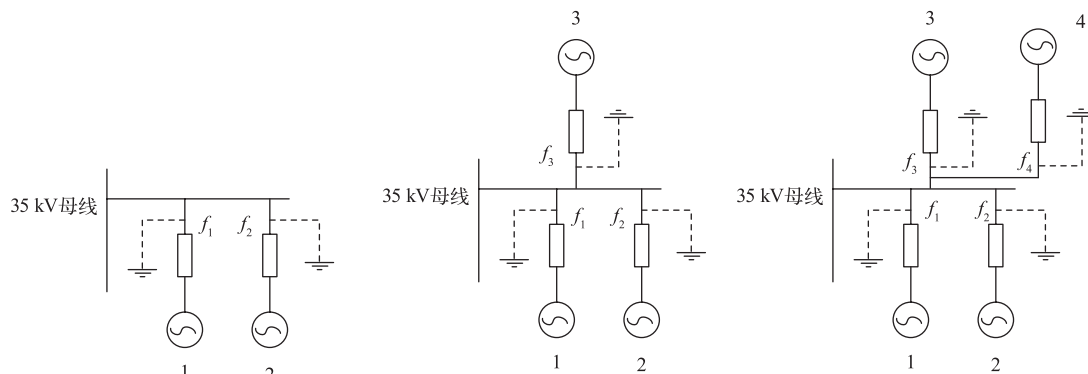


图6 单相接地等效故障类型

上述各类情况为现阶段风电场集电线路的不同故障类型的等效故障情况，图6中1、2、3、4风机均为支路等效风机，总体而言将风电场集电线路分为3种类型。第一种为简单的2支路情况，该情况下一般通过上述图5中提及的序网络即可实现故障点的大致区间判定，然后利用等效阻抗法即可实现其故障点精确计算；第二种情况下为多T接支路情况，可能出现多个故障点的情况，依据其T接点关键部位监测点设置位置可进行逐一排除；第三类情况为多T接点情况，同时T接线路中包含T接分支。该情况下需要利用多个参量进行故障支路排除，尤其是T接支路上的T接支路，该处计算容易产生误差，导致计算错误T接支路，从而导致故障测距失败，而实际的风电场集电线路结构往往存在上述3种结构混合的情况，从而导致了单相接地故障排查的难度加大。因此，一种适用于多T接支路的集电线路单相接地故障测距方式，且不受T接支路上的T接支路的影响显得极为重要。

多端信息融合故障定位

风电场集电线路多端信息融合是指结合既有的风电场最小分段等效方法进行该线路的故障最小区间划分，利用监测装置采集各个节点出口处单位量进行序网络分解。在分解之后等效计算出最小故障区间，然后对该区间内的两端监测装置进行行波故障点精确定位。在进行多端信息融合故障定位时，一方面，需要考虑多端信息融合最小区间的区分以及判定，即故障区间的最小划分监测装置最优个数以及终端安装位置；另一方面，综合考虑风电场集电线路的结构特性，利用其结构适应性的故障点精确定位算法，从而进行集电线路的故障点最优化求解。

1. 多端信息融合测量点设计

在进行多端信息融合测量点设计时，首先需要依托风电场集电线路结构进行适应性线路结构的监测装置安装点。由于风电场集电线路的特殊性，往往呈现辐射状的网络结构，因此线路基本呈现多分支短T接的结构。将风电场集电线路拆分为个体最小单元进行多端形容融合测量点位置设计，大致的集电线路可分为三种结构。

(1) 支线较少或者较短情况

由于风机线路上网基本采用电缆直接T接至集

电线路中，若集电线路不存在T接支线，或者T接支线较短（一般为T接支线小于1 km情况下），即线路结构为单一集电线路，一般情况下一条集电线路长度不会超过30 km，则该线路结构下一一般在集电线路首位进行监测终端的安装即可实现故障监测，等效示意图如图7所示。

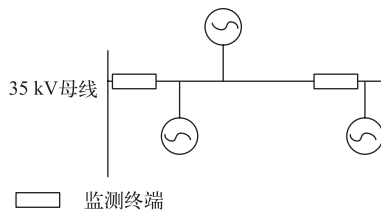


图7 支线较少或者较短情况下等效示意图

(2) 含有长支线

大部分风电场集电线路中都含有一定的支线，具体支线长度不一，可能存在支线长度较长，同时支线上存在大量风机的情况。该类情况下一般视集电线路结构来讲，其监测装置安装等效结构图如图8所示。

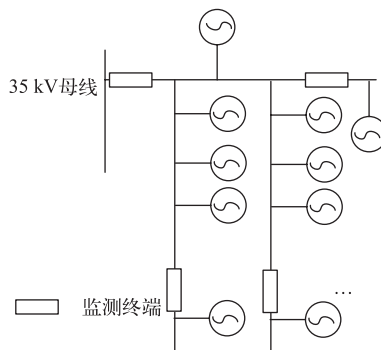


图8 含有长支线监测装置安装等效结构图

对于多T接支线，在多T接支线上线路末端设置监测装置安装点位，具体依据线路长支线条数以及分布结构进行监测装置安装点的实现。

(3) 长支线中含有多个T接支线

风电场集电线路中可能存在长T接支线中依然存在T接支线的情况，依据长T接支线的线路长短进行监测装置安装点的设置，如图9所示。在长T接支线中存在长度较长的T接线路，或者T接线路中T接存在故障频发的情况需要重点监测，如下为该线路监测装置安装点。

通过最小T接分支划分基本能够实现风电场集电线路的整体装置的安装，从而实现风电场集电

路监测装置安装点经济性。

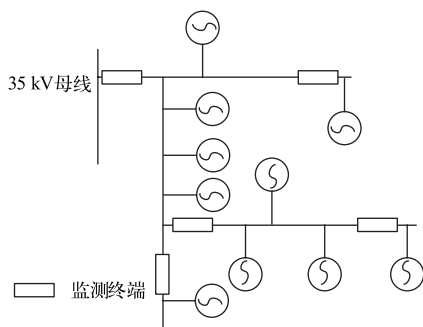


图9 长支线中含有多个T接支线安装等效结构图

2. 多端信息测距方法

在风电场集电线路故障点计算时，首先需要对该线路结构进行分析，依据集电线路结构特征最优化设置监测装置安装点，监测装置可以对关键部位的工频电流、电压，行波电流、电压进行采集，然后通过序网络的形式进行计算分析，从而实现任意风电场集电线路的故障区间的判定。在对该序网络分解时，需首先通过监测装置采集的电压、电流情况判定该系统是否发生单相接地故障，从而实现序网络的准确区分。确定了故障区间后，通过最小故障区间内行波情况实现故障区间内D行波法故障点精确定位。

结束语

本文首先分析了风电场集电线路的单相接地故障特征，在集电线路发生单相接地故障时，分解最小T接单元，利用序网络法实现了集电线路的单相接地故障分析，最优化监测传感装置的安装点位置。在实现集电线路故障最小区间的判定后，利用最小故障区间内双端行波故障点精确定位的方法进

行复杂集电线路的故障点精确定位，从而辅助现场运维人员快速实现故障信息排查。EA

(收稿日期：2023-09-19)

参考文献

- [1] 屠国宏. 风电场场内集电线路设计探讨[J]. 电气技术与经济, 2019(4): 64-66.
- [2] 许东升, 田凤兰, 赵珩, 等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 136-140.
- [3] 张新伟, 晁勤, 常喜强, 等. 风电场与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究[J]. 电工文摘, 2011(4): 7-10.
- [4] 许珉, 杨艳伟, 申克运, 等. 基于小波变换的电缆短距离开路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 112-116.
- [5] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和HHT的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39.
- [6] 沈毅, 沈志远. 一种非线性非平稳自适应信号处理方法-希尔伯特-黄变换综述: 发展与应用[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(5): 1-5.
- [7] 汪文东. 一起风电场箱式变故障的保护动作分析[J]. 电工文摘, 2013(3): 25-30.
- [8] 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.
- [9] 袁冰, 王宾, 陆元园, 等. 风电场并网线路单相接地故障单端测距误差特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 63-69.

