

[集电线路]

混架风电场集电线路故障测距方法研究

文/方占跃

广州发展新能源股份有限公司华北分公司

基于行波测距原理，推导混架集电线路中行波在电缆中以及架空线路中传输的波速度，推导出行波到达监测终端波头时刻 Δt 与故障点距离升压站之间距离 L 的关系，加入最小T接区间故障判定原理，实现了混架集电线路故障搜索以及精确定位，从而提升了系统测距经济性，为混架集电线路故障测距提供了新思路。

相较于西方发达国家，我国风力发电起步较晚，进入21世纪，风力发电得到了大力发展，截止2023年底装机容量达到3.6亿kW，同时每年以10%以上的增速高速发展，成为全球增速最高的国家之一。伴随着大体量、高增速发展的同时，风电场集电线路的结构也不断地发生变化，风电场集电线路大多分布于山脊、湖泊等处，受到地理位置以及风机布置位置的影响，线路结构整体呈现出多T接，线路架空混架的情况，而部分风电场集电线路在母线处增设Z型变压器，导致线路无法采用输电线路中故障测距的方案实现故障判定。对于多段混架以及多T接的情况，甚至无法判定故障点位于集电线路架空段还是电缆段，导致了故障排查极其困难，使风电场出现停运情况，进而造成了大量的经济损失。为此，大量学者针对风电场混架集电线路故障测距作出了研究：一部分学者提出分段阻抗测距的方案，在混架风电场集电线路在发生故障跳闸时，通过联立电压、电流方程，以风电场集电线路关键节点为主要参量，通过解多个未知数、多个方程的形式实现风电场集电线路的故障精确定位；另一部分学者提出基于行波测距的原理的电缆距离折算方法，当混架线路发生故障跳闸时，将混架段内的电缆线路折算成架空线路进行故障点的精确定位，从

而解决混架风电场集电线路定位的问题。

本文针对风电场混架集电线路推导出波头时刻与故障距离的关系图，通过建模结合线路停送电行波校核架空段以及电缆段的波速情况，加入最小故障区间判定方法，从而实现故障点求解。

风电场集电线路运行背景

风力发电系统由风机接收风能，将风能转化为电能传输至集电线路，然后通过集电线路传输至升压站，利用送出线路将电能输送至电网或其他负荷中，图1所示为某风电场集电线路等效示意图。从右到左，每个风机等效成一个独立电源，而每条集电线路存在大量的T接支路以及风机，风机产生690 V电压，传送至集电线路，集电线路升至35 kV，然后通过110 kV变电站送出，集电线路侧为保证线路正常稳定的运行，均采用中性点三角形方式连接，导致线路在发生单相接地故障或者高阻接地故障时，集电线路断路器无法正常断开，演变成风电场集电线路大规模脱网的恶性事件。在升压站母线侧加装Z型变压器，用以保证集电线路的零序保护动作。但由于集电线路走廊大部分为山川、湖泊和建筑物集中区域，为保证集电线路的稳定运行，集电线路大部分采用电缆架空混架，单个集电线路中往往

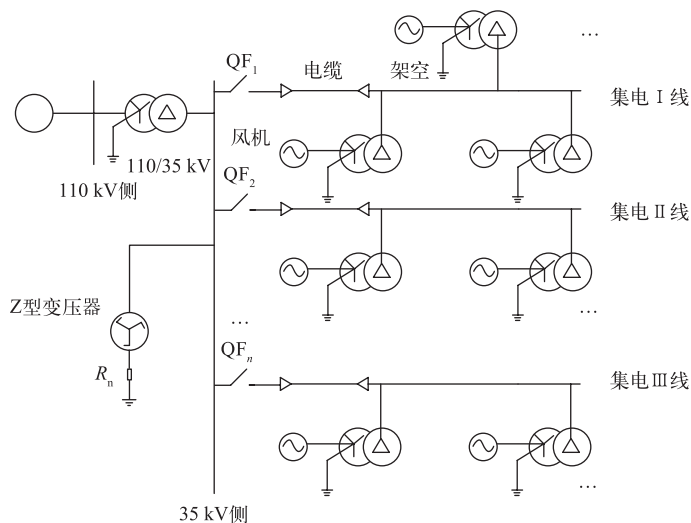


图1 某风电场等效示意图

存在多段电缆架空混架铺设的情况，集电线路运行环境极为复杂，站内的测距系统往往只能识别出同母线的那条集电线路发生故障跳闸，给出故障点到母线的距离，连故障点位于主路还是支路上都无法判定，只能通过人工巡查的方式进行故障点信息的排查，这对于快速恢复集电线路稳定运行极为不利。

混架集电线路测距方法

本文采用成熟应用于输电线路的行波法故障测距进行混架集电线路故障定位，在混架集电线路中采用行波法故障定位为行波在混架集电线路中传输的波速度、行波达到集电线路监测终端的波头时刻确认。

1. 混架集电线路故障测距波速问题

图1中含有三条集电线路，每条集电线路中都有电缆架空混架，而实际的风电场集电线路中往往机构更复杂，线路集中呈现多分支短T接的结构，当采用行波法进行故障测距时，由于行波在电缆线路中传输的波速度与架空线路中传输的波速度不同，可以采用折算波速的形式进行精确定位。首先采用电缆波速以及架空波速进行波速确认，然后采用等比将电缆长度换算成架空线路长度的形式进行故障点求解，求出故障距离后，再等效回原始结构进行故障点精确信息求解。此类操作会导致线路测距误差极大，甚至无法判定故障点准确位于电缆段还是架空段。本文中求取波速的方法分为两种。

1) 陆上集电电缆线路一般采用YJLV32型电

缆，其参数固定，同时排列方式为固定的，考虑到集电电缆线路实际运行情况，采用atp-empt建立三芯电缆线路等效模型，则行波在电缆线路中传输的波速为

$$v_d = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (1)$$

式中， dx/dt 为行波在电缆线路中传输的距离对时间的微分； ω 为频率，在国内取50 Hz； $\beta(\omega)$ 为行波相位，也为常数。

因此当集电电缆线路以及环境因素确认后，其行波传输的波速度为常数，在实际工程应用中进行波速求解时一般忽略线路对地导纳，则行波在电缆中传输的波速度为

$$v_d = \sqrt{\frac{1}{l_0 c_0}} \quad (2)$$

式中， l_0 、 c_0 分别为模量对应的行波传输波速度。

针对常规三芯集电电缆线路模量一般通过克拉克变换求解，因此可实现集电电缆线路的波速求解，用于实现集电线路故障点精确定位。

2) 集电电缆线路的波速度也可通过行波在电缆中传输的时间来求解，即在电缆线路两端安装监测装置，在已知电缆线路的长度 L 情况下，利用传输时间 t 进行求解，往往通过集电线路中升压站内断路器动作产生的行波进行波速的校核，则波速为

$$v_d = \frac{L}{t} \quad (3)$$

工程应用时,往往通过建模结合实际传输波速求取平均值的方法用于波速的求解,从而实现波速的高精度求解,上述方法同样适用于架空集电线路中。

2. 混架集电线路波头时刻确认

通过式(2)可知行波在混架集电线路中传输时,在架空段与电缆段波速存在明显的差异,应用于风电场混架集电线路故障测距时,受到风电场集电线路多分支短T接混架结构的影响,需采用双端行波法测距以保证故障监测的有效性,出于经济性考量,在研究双端行波法测距时,从经济型角度考量选用单条集电线路进行理论验证,如图2所示为某混架集电线路发生故障时行波折反射等效图。

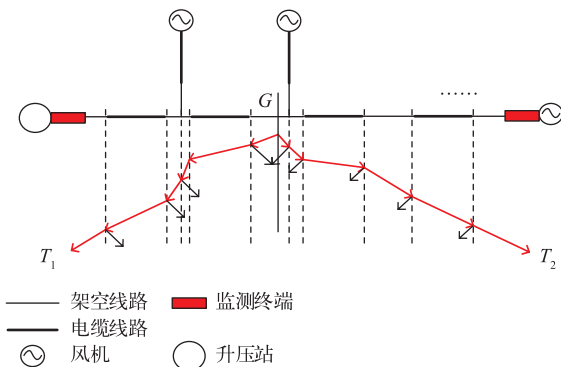


图2 某混架线路发生故障时行波折反射图

该结构中将较短支路忽略不计,线路中存在两条T接线路,将该T接支路等效至系统模型中,假设该混架集电线路中G点发生故障跳闸,依据行波传输理论,故障点产生的行波沿集电线路向两端传输,在遇到波阻抗不连续的点发生折反射,则行波在电缆架空连接处以及T接支路处发生折反射,图2中红色箭头代表了行波的折射方向,黑色箭头代表了行波的发射方向, T_1 为行波达到升压站侧监测终端行波的波头时刻, T_2 为行波到达集电线路风机末端终端波头时刻,依据行波双端定位原理,则G点到升压站的距离为

$$l = \frac{L - (T_1 - T_2) V}{2} \quad (4)$$

式中, l 为G点到升压站的距离; L 为升压站距离该集电线路末端终端的距离; V 为波速度。

该线路为混架线路,因此不能简单判定为行波在架空线路中传输的波速度或者在电缆线路中传输的波速度,通过式(4)即可实现故障点距离的理

论求解。

为方便行波在集电线路故障点求解,默认混架集电线路中架空线路材质一样,电缆线路材质一样,则行波在该混架集电线路中全线传输时,在电缆中传输的波速均为定位,设定为 V_1 。同样在架空线路中传输的波速度设定为 V_2 。以图2为例,由于故障点在集电线路中的随机性,因此无法判定故障点左侧或者右侧存在多点段电缆或者架空,只能通过设定未知数的形式进行故障点求解,而任意段的架空线路长度、电缆线路长度都是已知的,因此可以实现波头到达监测终端时刻的求解

$$\begin{aligned} T_1 - T &= \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2} + \dots + \frac{L_{j-1}}{V_{j-1}} + \frac{L_{(j,n)}}{V_j} - \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_{j-1})}{V_j} \\ T_2 - T &= \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_j) - L_{(j,n)}}{V_j} + \frac{L_{j+1}}{V_{j+1}} + \dots + \frac{L_n}{V_n} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T 为集电线路发生故障时绝对时刻; V_1 、 V_2 、 $\dots$ 、 V_n 为行波在集电线路中传输的波速度,由于无法确认故障点原因,不能确认为 V_1 为或者 V_2 , L_1 、 L_2 、 $\dots$ 、 L_n 为行波传输的距离,可能为电缆也可能为架空,依据式(4)对 T_1 、 T_2 ,进行差值计算即可求得 ΔT 值,则

$$\begin{aligned} l &= \frac{L - \left[\sum_{i=1}^{j-1} \frac{L_i}{V_i} + \frac{1}{V_j} (L_{(j,n)} - \sum_{i=1}^{j-1} L_i) - \frac{1}{V_j} (\sum_{i=1}^j L_i - L_{(j,n)}) - \sum_{i=j+1}^n \frac{L_i}{V_i} \right] \times V_j}{2} \\ &= \frac{V_j}{2} \left[\Delta t_j - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{L_i}{V_i} + \sum_{i=j+1}^n \frac{L_i}{V_i} + \frac{1}{V_j} (2 \sum_{i=1}^{j-1} L_i + L_j) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)默认故障点位于第 j 段,且 $\Delta t_j = T_1 - T_2$,仅通过赋值法即可实现故障区段的判定,同时由于式(5)中的 L_i 、 L_j 、 v_i 、 v_j 无论什么情况下均为定值,则故障点距离 l 与 Δt_j 可呈现明显线性关系,如图3所示。

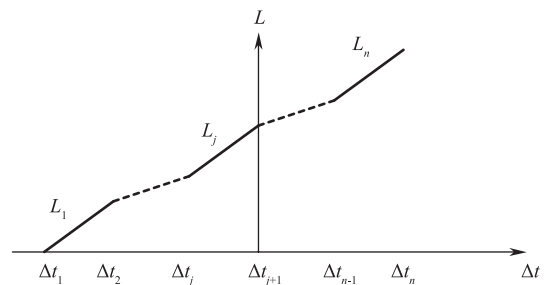


图3 某混架线路时间差 Δt 与故障距离 L 之间的关系曲线

本模型暂不考虑集电线路中存在的大量短T接模型,通过波头时刻差确认故障大致区段 L_1 、 L_2 、 $\dots$ 、 L_n ,从而实现行波波速的智能选取,进行

故障点精确定位。当行波波头时刻差值在图3中 Δt_1 与 Δt_n 之外时,则判定故障点位于监测装置监测区段之外,可能为集电线路送出线故障或者监测区间外的风机故障,从而区段判定即可。

3. 混架线路定位方法

在实际集电线路工程应用中,由于收到线路多T接支线因素的影响,往往不采用直接在主线集电线路两端安装监测装置的形式进行故障点精确定位。该方法不仅计算量大,同时精确定位效果不佳。一般采用关键支线或者长支线上安装的形式进行故障点确认,同时所有风电场集电线路都可等效成如图4所示模型,本模型忽略短支线或者不考量短支线定位。

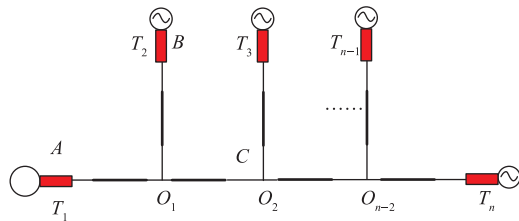


图4 集电线路混架等效模型

假设该混架集电线路中含有 n 个监测终端,当线路中发生故障时,各个监测终端采集到的波头时刻分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 $\dots$ 、 T_n ,从左到右以此将本线路分成 m 段,首先利用建立最小T接区间进行故障点判定,即从左到右取连续三个终端为一个做小区间进行故障区段计算,以最小T接中心点为原点 O ,以此建立矩阵。以下原则为故障区间判定原理。

- 1) 故障点发生于A-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 且 $t_1>t_2>t_3$ 。
- 2) 故障点发生于A-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 且 $t_1>t_3>t_2$ 。
- 3) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 时,若 $t_2>t_1>t_3$,则故障点发生不存在任何区域,继续搜索下一个最小区间即可。
- 4) 故障点发生于B-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 且 $t_2>t_3>t_1$ 。
- 5) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 时,若 $t_3>t_2>t_1$,则故障点可能发生在A-O、B-O和C-O段。
- 6) 故障点发生于C-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_2>L_3$ 且 $t_3>t_1>t_2$ 。

7) 故障点发生于A-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 且 $t_1>t_2>t_3$ 。

8) 故障点发生于A-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 且 $t_1>t_3>t_2$ 。

9) 故障点发生于A-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 且 $t_2>t_1>t_3$ 。

10) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 时,若 $t_2>t_3>t_1$,则故障点可能发生在A-O、B-O和C-O段。

11) 故障点发生于C-O段,则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 时,若 $t_3>t_2>t_1$ 。

12) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1>L_3>L_2$ 时,若 $t_3>t_1>t_2$,则故障点发生不存在任何区域,继续搜索下一个最小区间即可。

直到搜索出故障区间为止,以最小故障区间进行故障点研判,利用最小故障区间的两个监测终端进行定位,同样未知最小区间电缆架空段数,仅知道故障行波波头时刻到达监测终端的波头时刻 T_m 、 T_n ,利用波头时刻 T_m 与 T_n 的差值进行计算,查看 T_m 与 T_n 的差值位于图3中区间,其对应的距离 L_j 即为故障点,即可实现求取,本方法同样适用于纯电缆集电线路或者纯架空集电线路。

结束语

传统的应用于输电线路的阻抗法测距无法实现复杂混架拓扑结构的风电场集电线路的故障点求解,人工巡检以及离线式故障排查方式效率低下。

本文推导出了任意一集电线路中波头达到时刻差 Δt 与故障距离 L 之间的关系,采用最小T接滑块式原理求取故障最小区间,然后利用波头时刻与故障距离 L 进行准确值求解,同时该测距方案亦适用于纯电缆或者纯架空混架线路,为复杂拓扑结构的风电场集电线路提供了高经济价值的测距新思路。EA

(收稿日期: 2024-08-20)

参考文献

- [1] 费智,符平.我国风电发展的态势分析与对策建议[J].科技进步与对策,2011,28(10):65-68.