

[分布式故障测距]

基于分布式故障测距思路的自闭贯通故障测距研究

文/赵昊阳 任 桐 吕 澄 赵 鲛 吴恒文
中国铁路呼和浩特局集团有限公司

呼和浩特供电段基于分布式故障测距思路，对铁路10 kV自闭贯通线路进行故障测距研究。设计了一套模块化的自闭贯通故障测距装置，将该装置应用于铁路10 kV自闭贯通线路上，通过现场应用证明了分布式故障测距的稳定性与优越性，填补了现阶段10 kV自闭贯通故障精确定位的空白，减少了10 kV自闭贯通线路因不必要的故障跳闸造成的经济损失，保证了高速列车的稳定运行。

10 kV自闭贯通线路和牵引系统共同组成了铁路牵引供电系统。与牵引系统相比，10 kV自闭贯通线路所处的环境更为复杂多变。一般情况下，10 kV自闭贯通线路要经过高山、湖泊及基础环境较为复杂的自然环境，因此常采用电缆架空混架的方式敷设，并采用中性点非有效接地方式运行。在线路发生单相接地时，基本采用倒闸操作清除线路故障；当单相接地故障无法被清除时，采用人工区间巡线的方式清除故障，这对于线路的恢复相当不利。同时，由于10 kV自闭贯通线路基本上全线采用电缆架空混架敷设，线路阻抗分布不均，采用阻抗法故障测距导致线路故障测距失败，因此，设计一种适用于10 kV自闭贯通线路的有效故障测距装置极为重要。

自闭贯通线路测距现状

现阶段针对10 kV自闭贯通线路的故障测距手段主要有两种。

一种是采用故障指示器，基本原理是基于配电网单端供电模型，当线路中发生单相接地或者多相短路时，采集到短路电流的故障指示器翻牌，没

有采集到短路电流的故障指示器则不翻牌，利用这种特性实现10 kV自闭贯通线路的故障监测。故障指示器只对自闭贯通线路进行大概的故障区间判定，即对照两个相邻的故障指示器，当一个翻牌而另一个没有翻牌时，判定为故障区间。由于自闭贯通线路走廊大部分区域处于人烟稀少、网络信号极差的地方，导致了故障指示器监测故障的效果不佳。

另一种是注入特殊频率信号，采用信号监测的方式进行故障测距。当系统发生故障跳闸时，线路注入频率为 $16\frac{2}{3}$ Hz的信号并对其进行监测，实现故障测距。基本原理是，注入的信号沿自闭贯通导线向前传播，当遇到线路故障点时流向线路接地点，实现自闭贯通线路的故障测距。由于自闭贯通线路大部分采用电缆架空混架敷设，注入的信号在电缆架空处发生折反射，同时信号传递具有衰减特性，这些对于线路故障点的监测极为不利，该方法为离线式故障监测，即线路发生故障跳闸之后才能进行故障测距。

现阶段自闭贯通线路故障测距面临着精度不高和操作复杂的问题，不利于自闭贯通线路发生故障后线路的恢复。

分布式故障测距系统

分布式故障测距系统基于分布式故障测距思路,在自闭贯通线路沿线安装分布式故障测距装置,当自闭贯通线路发生单相接地或者多相短路时,行波沿着自闭贯通导线向两边传播,只需要采集到行波的波头时刻,再结合线路的实际结构即可进行故障的精确定位。分布式故障测距装置采用模块化的设计,包括采集模块(电压传感器/电流传感器)、通信模块(4G通信/无线通信/光纤通信)、数据处理模板(STM32系统/采集主板)及电源模块(7 V备用电源/太阳能电池板/CT取能模块),模块之间相互独立,但又共同负责行波法故障测距装置的稳定运行。

1. 电压传感器

10 kV 自闭贯通线路采用单端电源供电,线路运行模式采用中性点非有效接地方式。当线路发生单相接地时不发生故障跳闸,而线路的电压发生明显变化,电流量变化较小,如仅采用单一的电流量变化进行线路状态监测,无法有效判定线路的倒闸操作和单相接地故障,因此,在分布式故障测距思路基础上引入了电压传感器进行线路单相接地故障的监测。

由于分布式故障监测装置安装于导线上,不像站内PT一样对导线电压进行监测,因此文中所述电压传感器采用电容分压原理实现线路电压的监测,即采用分布电容技术进行电容分压,实现线路电压的测量。在监测终端上设计金属薄片,利用金属薄片与导线之间和金属薄片与大地之间的自然电容进行电压测量。金属薄片设计成与导线同心圆的结构,为弧形结构,与导线圆心之间的距离为 R ,导线半径为 r ,宽度为 A ,扇形的弧度角为 θ ,则该金属薄片对高压导线的电容 C 为

$$C = \frac{\varepsilon a \theta}{\ln R - \ln r} \quad (1)$$

合理设计金属薄片的尺寸,自闭贯通导线和金属片之间的电容为皮法级。查阅文献,金属薄片与大地之间的电容为微法级。依据串联电容分压理论,电容越小,分压越大,而金属薄片与导线之间的电压基本是金属薄片与大地之间电压的1 000倍,可近似看作电压主要集中在金属薄片与自闭贯通导线上,因此只需要监测金属薄片与导线之间的电压即可。

2. 电流传感器

电流传感器安装于自闭贯通导线上,由于自闭贯通线路长,一般情况下为单个供电臂的长度,同时线路上仅带有一部分较低的负荷,比如站内空调/照明系统、接触网上信号灯及一些特殊的供电负荷,因此线路负荷长期处于极低的状态。本文采用改进的罗氏线圈传感器进行10 kV 自闭贯通线路的取能以及故障测量,高频性能良好,输入和输出的关系为

$$e(t) = -M \frac{di_1(t)}{dt} = L_0 \frac{di_2(t)}{dt} + (R_0 + r) i_2(t) \quad (2)$$

式中, $e(t)$ 为输出电压信号; $i_1(t)$ 为自闭贯通导线负荷电流, M 为传感器线圈与自闭贯通导线之间的电感; L 、 R_0 和 r 为传感器线圈的自感、线圈内阻和线圈输出回路的自积分电阻; $i_2(t)$ 为自积分回路中电阻电流。

而自积分电阻和传感器线圈的内阻之和相对较小,由于传感器线圈的阻抗远大于线圈的自积分阻抗,因此可将式(2)简化为

$$e(t) = i_2(t)r \approx -\frac{Mr}{L_0} i_1(t) \quad (3)$$

由式(3)可知:罗氏线圈传感器通过自积分回路输出的电压信号基本与自闭贯通线路负荷成显线性关系,很好地满足自闭贯通线路中负荷采集及故障信号采集的需求。

3. 工作系统模块

分布式故障监测装置安装于自闭贯通导线上,利用上述监测传感器模块进行现场数据的采集、记录和上传。模块化的设计思路保证了监测装置之间互不干扰,分布式故障测距装置如图1所示。



图1 分布式故障测距装置

应用

1. 背景

隶属于呼和浩特局呼和浩特供电段呼和水电车间陶卜齐配电所和呼东配电所之间的贯通线路中间存在一个信号所和一个重要台式变压器,线路全长约为27.009 km,其中包含10段电缆,电缆全长约

为8.854 km，属于典型的多段电缆架空混架线路，现阶段采用的故障监测手段为翻牌式故障指示器。线路走廊基本为高山和湖泊，一旦线路发生永久性接地故障，现场运维人员就需要消耗大量的人力物力进行故障的处理，因此选用了分布式故障监测系统对线路进行故障监测，线路基本结构和分布式故障测距装置安装点如图2所示。

2. 故障定位情况

分布式故障监测装置投运以来运行良好。线路于2022年4月发生单相接地故障未跳闸，在进行倒

闸操作后，线路故障点依然存在，分布式故障监测系统检测到线路电压跌落迅速启动故障预警，并进行了自动诊断。分布式故障监测系统采集的终端上传的工频电压电流如图3所示。

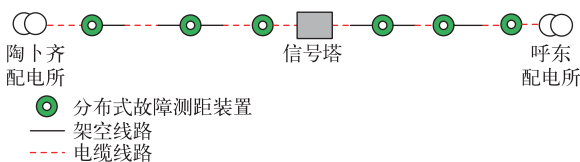


图2 线路基本结构和分布式故障测距装置安装点

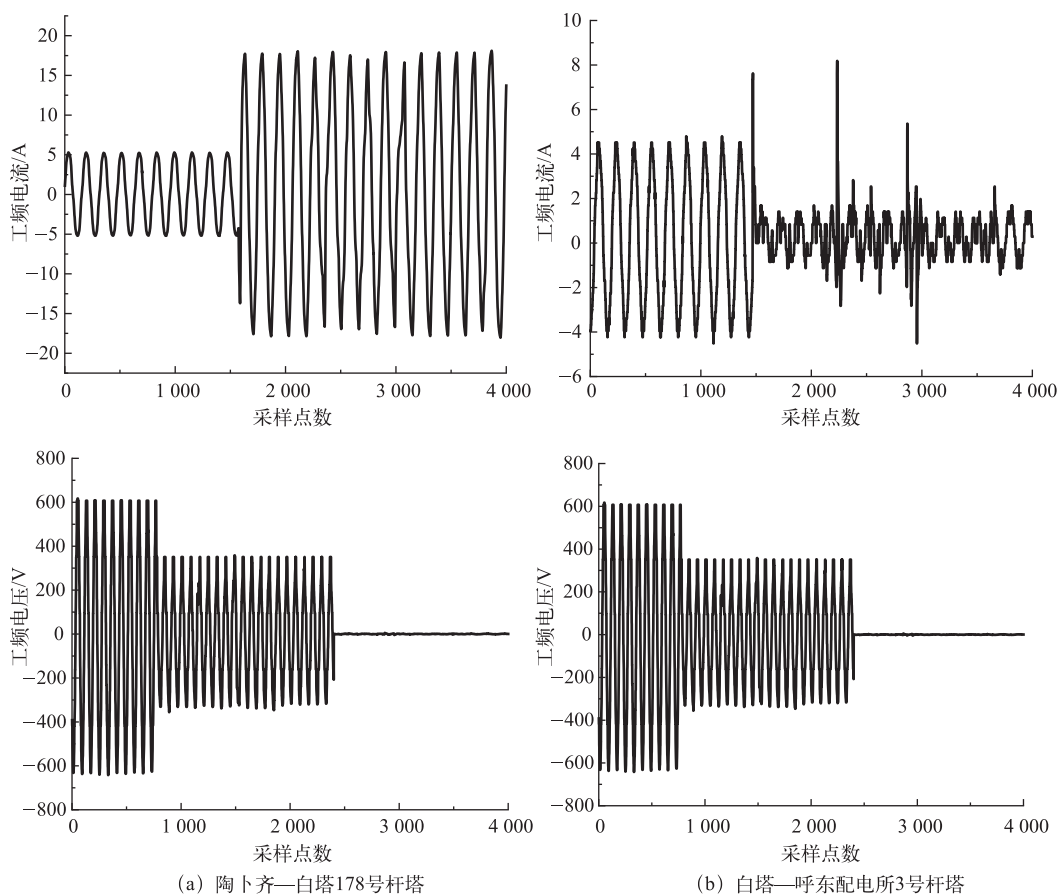


图3 分布式故障监测系统采集的终端上传的工频电压电流

由于自闭贯通线路采用中性点非有效接地方式运行，采用单端电源供电，故障点前靠近电源侧存在短路电流，而故障点后不存在短路电流。自闭贯通线路发生单相接地后，分布式故障监测系统迅速判定故障点位于陶卜齐—白塔178号杆塔和白塔—呼东配电所3号杆塔之间，对两个监测装置进行行波精确定位，发生单相接地时两个监测终端的行波电流如图4所示。

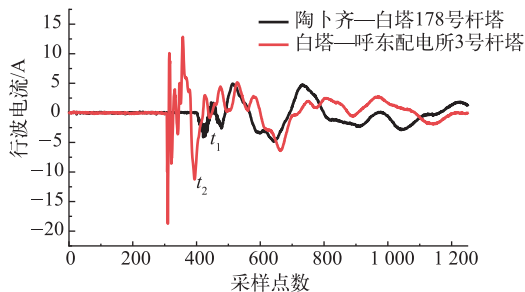


图4 发生单相接地时两个监测终端的行波电流合并图

据D行波法故障测距有

$$\begin{aligned}\Delta t &= |t_1 - t_2| \\ X_m &= \frac{(L + V_m \Delta t)}{2} \\ X_n &= \frac{(L - V_m \Delta t)}{2}\end{aligned}\quad (4)$$

从式(4)可知,D行波法故障测距只受行波达到最近的监测终端的有效波头时刻及波速的影响,而自闭贯通线路采用电缆架空混架,只能进行波速的换算,行波的波头时刻是确认的,只需要知道行波波速即可实现行波故障精确定位。结合现场实际情况,线路故障区间内最近的两个监测终端距离为1 924 m,其中电缆长度530 m,通过式(4)可知,故障点位于陶卜齐—白塔178号杆塔大号侧1 803 m,故障杆塔为白塔—呼东配电所1号塔,呼和水电车间现场运维人员在接到线路隐患放电的短信后,迅速赶到白塔—呼东配电所1号塔,白塔—呼东配电所1号塔避雷器发生击穿接地,导致线路发生单相接地故障,分布式故障定位系统的定位结果和现场故障点没有误差。

结束语

基于分布式故障思路设计的分布式故障监测系统采用模块化设计,模块之间相互不干扰,共同协作完成了自闭贯通线路的故障测距,经现场使用,验证了系统的优越性。

基于行波的故障测距手段填补了自闭贯通线路在线式故障测距的空白,是未来自闭贯通线路故障

测距的应用发展方向。EA

(收稿日期:2023-02-06)

参考文献

- [1] 王雪文,石访,张恒旭,等.基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2019,43(3):818-825.
- [2] 王世林,刘柱,张喆,等.基于智能配变终端的配电网单相接地故障检测技术研究[J].电网技术,2019,43(12):4291-4298.
- [3] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [4] 董新洲,毕见广.配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):1-6.
- [5] 张峰,梁军,李建超,等.基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J].电力系统自动化,2013,37(4):108-113.
- [6] 王雪文,石访,张恒旭,等.基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2019,43(3):818-825.
- [7] 任俊谕,李本瑜,赵明,等.基于计算电阻指标和双端测量信息的高压直流输电线路故障测距方法[J].电气应用,2021,40(6):24-31.
- [8] 王云鹤.基于暂态分量的10 kV配网故障定位[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.

