[架空地线]

带电修补断股架空地线研究及应用

文/国网湖南省电力有限公司输电检修分公司　夏增明　王振宇　胡　康　许文韬　徐　溧　蒋智鹏　曾文远

基于输电线路架空地线断股带电修补场景，对作业时安全距离及机械强度校验从理论进行分析，并设计了一种带电快速修补架空地线工具。进一步围绕±800 kV宾金线0405#–0406#档中地线断股带电修补的安全性、可行性进行分析，针对带电修补存在的具体问题，提出相应的解决方案，并应用于生产现场，作业结果表明采用上述所证明的方法及设计的工具，可圆满完成作业任务。

输电线路产生各种缺陷概率的大小随着运行时间的增加而增大。根据研究，当达到一定运行年限时，输电线路故障发生地在档距中央的概率超过60%，其中尤以档中地线概率最大，地线断股就是常见的输电线路缺陷之一。

地线断股的主要原因是地线局部发热和外破。局部发热主要是雷击造成的，这种情景多发生在超特高压输电线路上，因其多经过雷电较为频繁的山区。而外破主要发生在500 kV以下输电线路上，其主要经过城区。地线断股对线路的影响主要有两个方面：一方面是影响线路防雷效果，可能增大雷击跳闸概率，严重时甚至出现雷击断线的情况。另一方面，地线断股会造成断股点两侧受力不均且受力增大，在线路舞动、覆冰等极端天气时，两侧受力将进一步增大，同时增大了地线断股的概率。因此，地线断股给线路的安全稳定运行带来了严重的威胁，严重时甚至出现短线的事故，造成重大电网事故，亟需对地线断股及修补进行深入的研究。

本文从理论上对带电修补断股地线时安全距离及机械强度校验进行分析，并设计了一种带电快速修补架空地线的工具，通过现场应用与分析，验证了方法及工具的安全性和可行性。

安全距离及机械强度校验理论分析

带电修补断股架空地线时，由于运行线路中架空地线带电处理，作业人员进入作业点导致弧垂增大，带来安全距离校验的问题，与此同时，地线断股将导致机械强度降低，架空地线的机械强度校验也必不可少。

1. 安全距离校验分析

以架空地线孤立档中为例进行分析，当档中某距绝缘子串x的点作用荷载为q时，该点处弧垂发生变化，变化后弧垂f可用式（1）进行计算

$$f=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma_x(L-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{xqb}{\sigma_0 L} \tag{1}$$

式中，σ_0为地线水平应力，单位为N/mm^2；β为两悬挂点高差角，单位为（°）；γ为地线比载，单位为N/(m·mm^2)；γ_x为地线水平比载，单位为N/(m·mm^2)；γ_s为绝缘子串比载，单位为N/(m·mm^2)；L为档距，单位为m；λ_0为绝缘子串水平投影长度，单位为m；q为集中荷载的单位截面载荷，单位为N/mm^2。

在工程计算中，弧垂的计算一般不考虑邻档地线应力变化和相邻塔的影响，因此，绝缘子串比载与地线比载式很接近，此时式（1）可简化为

$$f=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma_x(L-x)}{2}\right]+\frac{xqb}{\sigma_0 L} \tag{2}$$

将作业人员重力及作业点数据代入式（2），可计算出弧垂变化后的数值，通过比较变化后地线-导线间距离与该电压等级下安全距离，可完成安全距离校验。

2. 机械强度校验分析

架空地线档中某点作用荷载为q时，荷载前后应力σ_1、σ_2之间关系为

$$\begin{aligned}\sigma_2-\frac{El_0^2g_l^2}{24\sigma_2^2}-\frac{l_xq(q+l_xg_lA)E}{8A^2\sigma_2^2\Sigma l_i}=\\ \sigma_1-\frac{El_0^2g_l^2}{24\sigma_1^2}-\alpha E(t_2-t_1)\end{aligned}\tag{3}$$

式中，σ_1、σ_2单位为MPa；t_1、t_2分别为集中荷载作用前和作用后的气温，单位为℃，一般取$t_1=t_2$；q为集中荷载，单位为N；l_x为集中荷载作用档的档距，单位为m；l_0为绝缘子串长度，单位为m；$\sum l_i$为地线总长度，单位为m；g_l为导线的比载，单位为N/(m·mm^2)；A为导线截面积，单位为m^2；E为架空地线弹性系数，单位为MPa；α为地线热膨胀系数，单位为1/℃。

将断1股到n股后地线数据代入式（3），可计算地线剩余拉断力，考虑安全裕度，与地线最小拉断力相比较，得到符合作业要求时地线断股数量最大值，进而完成某场景下机械强度校验。

带电快速修补架空地线工具设计

针对现有带电修补断股架空地线作业人员任务量较大的问题，作业人员接近故障点时，往往体能消耗严重，继续修补地线将增大作业风险，同时修补质量也得不到有效保证，鉴于上述问题考虑，本文设计了一种基于高压铁塔地线铝绞丝快速修补作业的地线断股带电快速修补工具。

该工具设计图如图1所示，其参考了人工作业的流程和动作，设计了可夹持压紧的轮式结构，模拟人工作业进行铝绞丝快速缠绕。该地线断股带电快速修补工具能够通过夹紧传动机构中夹块，压紧地线及其铝绞丝缠绕位置，完成地线断股处快速修补作业。这种地线断股带电快速修补工具不仅解决了检修人员在高压铁塔地线上修补作业的危险、工作强度大等问题，还有效地弥补了地线断股修补的效率问题。

图2为该工具实物图，其特征在于：可快速放入和脱离地线，方便人工作业。现已在各电压等级中试用，反馈良好，既安全可靠，又方便省力。

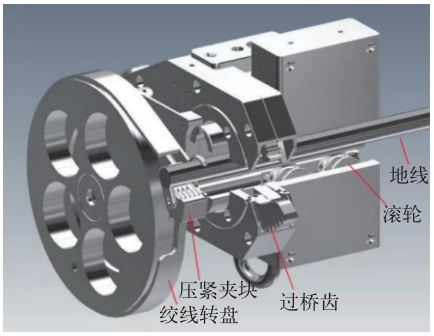

图1　工具设计图

图2　工具实物图

现场应用与分析

以±800 kV宾金线0405#-0406#档中地线断股为例进行理论分析与现场应用。

经过现场勘查，作业现场气温为20 ℃，断股点所在档中档距为308 m，缺陷发生在0406#右地线小号侧，距绝缘子串90 m处，共断1股。其地线参数见表1。

表1　地线相关参数

参数	地线
根数×直径/mm	19×3.15
截面积/mm^2	148.07
外径/mm	15.74
单位质量/(kg/km)	989.4
计算拉断力/N	178 570
线膨胀系数/(1/℃)	1.26×10^{-5}
弹性系数/MPa	147 200

1. 作业方式

0405#与0406#两塔间档距为308 m，地线悬点高差93 m，其他数据如图3所示。

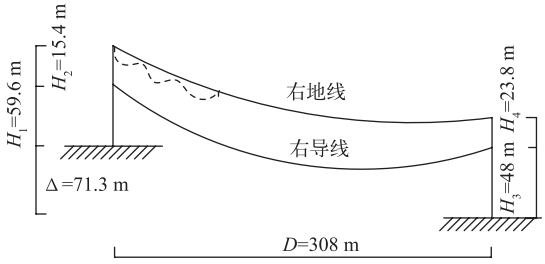

图3　作业方法示意简图

根据地线修补常规方法，在保证接地良好且安全距离满足的条件下，通过攀登较高杆塔进入地线，利用自身重量与档间高度差，通过控制绝缘绳索到达地线断股点，修补工作结束后，通过地面配合人员拉动滑车，将作业人员拉回进入点，下塔完成作业。在此场景下，可从0406#杆塔下地线，作业后再返回0406#杆塔。

参考地线相关参数（表1），可计算受损面积占地线总面积的比值S=(1/19)×100%=5.26%，参考直流输电线路运行规程相关规定可知，导线断股比例小于7%，即S<7%，可采用预绞丝或金属单丝进行修补。

2. 安全距离校验

当作业人员进入地线后，集中荷载为q，集中载荷作用于地线示意图如图4所示。

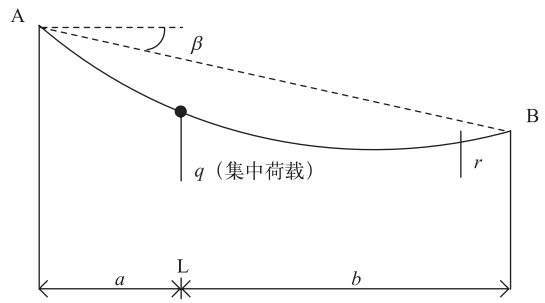

图4　集中载荷作用于地线示意图

作业人员加工具不超过100 kg，地线集中载荷按增加1 000 N计算，将地线参数表1中数据代入式（2）中，可得地线断股点增加弧垂Δf=0.9 m，此时，断股点导-地线线间距离减小至17.3 m，满足该电压等级下安全距离的要求，可完成安全距离校验。

3. 机械强度校验

通过查表可知，年平均运行张力F_1=44 642 N，该处地线最大使用张力F_2=51 020 N，安全系数为3.5，计算拉断力F_3=178 570 N。将数据代入式（3）中，可得到不同断股数地线剩余拉断力，见表2。

表2　不同断股数后地线剩余拉断力

断股根数	剩余拉断力/N	断股根数	剩余拉断力/N
1	169 171	9	93 984
2	159 773	10	84 585
3	150 374	11	75 187
4	140 976	12	65 788
5	131 577	13	56 390
6	122 179	14	46 992
7	112 781	15	37 593
8	103 382	16	28 195

通过查找资料可知，考虑安全裕度，地线拉断力满足F>58 300 N，即可进行出线作业，结合表2中数据可知，该处地线断股数量小于12，都满足机械强度校验条件，该条件下，均可进行地线修补作业。

4. 工具现场试用

为验证本文所述带电修补地线的作业方式安全性及设计的快速修补工具的实用性，保障特高压电网安全稳定运行，国网湖南输电检修公司带电作业中心针对±800 kV宾金线0405#-0406#档中地线断股进行带电修补地线工作。

根据上述安全距离校验和机械强度校验，采用本文所设计快速修补工具进行地线修补作业是安全可行的。

在作业现场中，采用上述所证明的方法及设计的工具，圆满地完成了作业任务，从实践中予以了证明，同时进一步验证了所研制的工具较为轻便，方便作业人员在地线上使用，大大降低了作业安全风险和作业人员的劳动强度，提高了作业人员的作业效率。

结束语

分析了带电修补断股架空地线安全距离和机械强度，为作业时安全性奠定了理论基础。

设计了一种带电快速修补架空地线工具，该工具使得带电修补地线工作变得更加安全可靠、方便省力。

在±800 kV宾金线0405#-0406#档中断股地线进行了带电修补现场应用与分析，通过理论分析验证了作业的安全性和可行性，有力地提升了输电线路带电作业水平。EA

（收稿日期：2021-11-11）