[接地系统]

输电线路杆塔接地技术探讨

文/国华能源投资有限公司山东分公司　张小坡
威海供电公司　邢小军

输电线路杆塔接地技术对电力系统的安全稳定运行至关重要，降低杆塔接地电阻是提高输电线路耐雷水平和改善地线热稳定的一项十分重要的措施。综述了工频接地电阻和冲击接地电阻的计算方法，对接地电阻偏高的原因进行了讨论，并提出了降低接地电阻的措施。

输电线路杆塔接地技术对电力系统的安全稳定运行至关重要。

一方面，随着电力系统的发展，由雷击输电线路引起的事故日益增多，尤其在雷电活动强烈、土壤电阻率高和地形复杂的地区，雷击输电线路而引起的事故率更高。当雷击输电线路杆塔时，雷电流i经杆塔和接地装置流入地下，此时塔顶电位U_t为

$$U_t=\beta\left(R_i+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right) \tag{1}$$

式中，R_i为杆塔接地装置的冲击接地电阻；L为杆塔的电感；β为分流系数。

当U_t与输电线路上由于感应和耦合产生的电位差超过了绝缘子串的放电电压时，绝缘子串就会发生闪络，从而可能导致输电线路甚至系统事故。由式（1）可知，当其他因素一定时，U_t与R_i成正比，R_i越小，U_t也越小，输电线路发生反击闪络的事故概率越低。所以降低杆塔接地装置的冲击接地电阻R_i是提高输电线路耐雷水平的最有效和最直接的途径。

另一方面，随着电力系统容量的迅速增加，输电线路发生单相接地故障时的短路电流也越来越大，从而流经地线的短路电流也越来越大，为了满足地线热稳定的需要，就要采用单位长度电阻较小的地线，从而导致地线的截面过大。特别是随着OPGW复合光缆在电力系统中的广泛使用，这一问题越来越突出。如果降低杆塔工频接地电阻R，就能增强故障时杆塔的分流作用，减小流经地线的短路电流，从而可以减小地线的截面，有效地降低工程造价。

可见，衡量杆塔接地装置把直击于杆塔或避雷线的雷电冲击电流引入大地的性能指标是冲击接地电阻，衡量杆塔接地装置把故障短路电流引入大地的性能指标是工频接地电阻。降低杆塔接地装置的接地电阻具有非常重要的现实意义。

接地电阻的计算

在输电线路设计时就需要进行杆塔接地装置的接地电阻计算，考虑如何降低工频接地电阻和冲击接地电阻。

1．工频接地电阻的计算

1）水平敷设的杆塔接地装置的工频接地电阻R_h为

$$R_h=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{D}+A\right) \tag{2}$$

式中，ρ为土壤电阻率，单位为Ω·m；L为水平接地体的总长度，单位为m；h为水平接地体的敷设深度，单位为m；D为接地体的直径或等效直径，单位为m；A为水平接地体的形状系数。

2）单根垂直接地体的工频接地电阻R_v为

$$R_v=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{8L}{D}-1\right) \tag{3}$$

式中，L为垂直接地体的长度，单位为m；其他参数同式（2），且$L\gg D$。

3）实际工程中也经常采用由水平接地体和几根垂直接地极连接起来组成的杆塔组合接地装置，其工频接地电阻R_g为

$$R_g=\frac{\frac{R_v}{n}R_h}{\frac{R_v}{n}+R_h}\times\frac{1}{\eta} \tag{4}$$

式中，η为考虑到所有电极相互屏蔽后的利用系数；n为垂直接地极的根数。

应该注意的是，式（2）中接地体总长度L相同时，形状系数A越大，接地体间的相互屏蔽作用就越明显，接地体的利用就越不充分。所以在进行杆塔接地装置的设计时，应尽量采用形状系数较小的接地装置，以提高接地体的利用率。

2．冲击接地电阻的计算

计算杆塔冲击接地电阻R_i时应考虑火花效应的影响。试验表明：单根水平接地体电位为1 000 kV时，放电区域直径达70 cm，高幅值的雷电流i经接地引下线注入接地网，会引起部分或全部接地分支周围土壤的火花放电，如图1所示。土壤的火花效应等效增大了接地体的直径，从而降低了接地体的冲击接地电阻R_i。

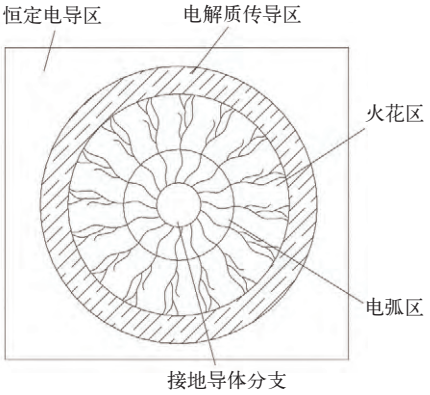

图1　土壤火花放电示意图

实际工程中可以直接测量出杆塔接地装置的工频接地电阻R_i，再乘以冲击系数后就能得到其冲击接地电阻R_i，即

$$R_i = \alpha R \tag{5}$$

式中，α为冲击系数。

对普通铁塔接地装置的冲击系数为

$$\alpha = 0.74\rho^{-0.4}(7+\sqrt{L})[1.56-\exp(-4I_i^{-0.4})] \tag{6}$$

普通钢筋混凝土杆放射型接地装置的冲击系数为

$$\alpha = 1.36\rho^{-0.4}(1.3+\sqrt{L})[1.55-\exp(-4I_i^{-0.4})] \tag{7}$$

普通钢筋混凝土杆环型接地装置的冲击系数为

$$\alpha = 2.94\rho^{-0.5}(6+\sqrt{L})[1.23-\exp(-2I_i^{-0.3})] \tag{8}$$

式（6）～式（8）中，ρ为土壤电阻率，单位为Ω·m；L为接地体的总长度，单位为m；I_i为流经接地装置的冲击电流，单位为kA。

注：式（6）、式（7）和式（8）均为经验公式。

冲击接地电阻R_i有着与工频接地电阻R不同的冲击特性。

1）R_i随冲击电流幅值的增加而减小，但是当冲击电流达到一定值以后其减小呈饱和趋势。

2）R_i随接地装置几何尺寸的增加而减小，但是当几何尺寸增加到一定值以后，接地体的电感作用加强，其减小呈饱和趋势。

3）R_i随土壤电阻率的增加而增加，但是当土壤电阻率增加到一定值以后，其增加呈饱和趋势。

4）对水平埋设的接地装置，R_i随埋深的增加而减小，但是在埋深达到一定值以后，地面对水平接地装置散流的影响将变得很小，基本上不再影响冲击接地电阻。

影响接地电阻的主要因素

输电线路杆塔接地装置的接地电阻偏高的地段，往往是一些土壤电阻率较高、地形复杂、交通不便或接地装置施工困难的地段，而这些地段往往是雷电活动频繁的山区，所以分析接地电阻偏高的原因并采取有效的降阻措施是工程中必须解决的实际问题。输电线路杆塔接地装置的接地电阻偏高的原因有很多，归纳起来主要有以下几个方面。

（1）土壤电阻率高

土壤电阻率ρ取决于土壤中导电离子浓度和含水量，导电离子浓度和含水量越低，土壤电阻率越高。大多数岩石和黏土等在干燥状态下导电性能非常差，而山区的土壤中多不含无机盐类，并且在降雨量较少的地区，表层土壤相当干燥，土壤电阻率较高，岩石地区的土壤电阻率一般在2 000～5 000 Ω·m，杆塔接地装置的接地电阻也就居高不下。温度也是影响土壤电阻率的一个重要因素，土壤电阻率随温度的升高而下降，如多年冻土的电阻率就较高，可达未冻前的数十倍。

（2）杆塔接地装置设计不合理

在高土壤电阻率的山区，有些杆塔接地装置的设计不合理，主要是接地装置的形式选用不恰当，接地体面积过小，所选用的接地体材料不耐腐蚀，各个接地极布置不合理、相互间的屏蔽作用较显著。

（3）施工方面的原因

输电线路施工线长面广，各处土壤及地质环境又不尽相同，加上部分施工人员责任心不强，并缺乏必要的监督，造成施工质量达不到设计要

求的标准。施工中最常见的问题是接地装置埋深不够，特别是在山区、岩石地区等开挖较困难的地段更是如此。接地体埋得越浅，在散流时靠近地面部分的电流线受地面的影响，不能直线伸展而呈曲线状，使电流线方向发生改变，即靠近地面部分的电流线密度加大，接地体不能充分散流，如图2所示，因而呈现的冲击接地电阻R_i就越大；同时越靠近地表的土壤受气候的影响越容易干燥，土壤电阻率也越高，并且由于其含氧量也较高，对接地装置的腐蚀情况也较严重，这也会使冲击接地电阻偏高。另外施工中接地回填土往往达不到设计的要求，尤其在岩石地段施工时，由于取土困难，部分施工人员直接用开挖出的碎石回填，回填后又未夯实，不仅加大了接地体和土壤间的接触电阻，而且经雨水冲刷后回填土会流失，甚至造成接地体裸露于地表。

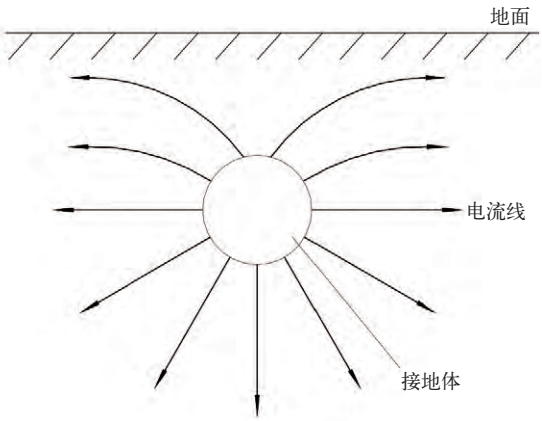

图2　地面对接地体散流的影响

（4）运行方面的原因

有些杆塔接地装置在输电线路投运初期其接地电阻是合格的，但经过一定的运行周期后，接地电阻就会变大，这除了某些施工时留下的隐患外，还有运行方面的原因。如在山坡地带覆盖在接地体上的土壤经随雨水流失后而未及时填充新土，接地体腐蚀较严重后而未及时更换等。另外接地引下线被盗或被腐蚀从而断开了杆塔与接地体间的电气连接，或者接地引下线部分断开，减少了雷电流注入接地装置的注入点个数，从而也增大了冲击接地电阻R_i。

（5）降阻剂的不当使用

不恰当地采用某些化学降阻剂，虽然在短期内能起到降阻作用，但是随着化学降阻剂随雨水流失，并加速接地体的腐蚀，在一定时期以后接地电阻会迅速反弹，并缩短接地体的使用寿命。

降低接地电阻的主要措施

DL/T 621—1997交流电气装置的接地规定，有地线的输电线路每基杆塔的接地装置，在雷季干燥时，不连地线的工频接地电阻，不宜超过一定的数值，如表1所示。

表1　有地线的架空输电线路杆塔工频接地电阻

土壤电阻率 ρ/(Ω·m)	100及以下	100以上至500	500以上至1 000	1 000以上至2 000	2 000以上
工频接地电阻R/Ω	10	15	20	25	30

注：如土壤电阻率很高，接地电阻很难降低到30 Ω时，可以采用6～8根总长不超过500 m的放射形接地体或连续伸长接地体，其接地电阻可不受限制。

在杆塔接地电阻偏高的地段，应根据实地勘测的结果，采取经济有效的降阻措施。降低杆塔接地电阻的措施主要有以下几种方式。

（1）充分利用杆塔的自然接地作用

在输电线路杆塔接地工程中，充分利用钢筋混凝土结构物中的钢筋骨架及其他一些金属结构物等自然接地体，可以有效地减小杆塔接地电阻，并且还能节约钢材，使接地体电位更加均衡，工程设计中应充分加以利用。例如在开封至新乡东黄河大跨越工程中，由于大跨越铁塔立于河槽中，该段黄河河床泥沙淤积较厚，河水冲刷深度达十几米以上，不可能敷设普通的人工接地装置；而铁塔的基础为数十根现浇钢筋混凝土桩基础，每根桩中为钢筋笼骨架，工程设计人员将接地引下线与钢筋笼相连接，从而实现对铁塔自然接地体的利用，经实测铁塔不连地线的自然接地电阻小于3 Ω，已完全能满足工程需要，无需再敷设人工接地装置。不过，只有在土壤电阻率ρ≤300 Ω·m时才考虑杆塔的自然接地作用。

（2）合理选择接地装置的形式和几何尺寸

选择接地装置形式，应力求散流支路较多同时又要尽可能地减小相互间的屏蔽作用；增加接地装置的几何尺寸，从而减小接地电阻。应该注意的是，增加接地体的长度可以增加接地装置的散流面积，减小工频接地电阻R，从而减小冲击接地电阻R_i，但是由于冲击电流频率较高，随着接地体长度的增加，其感抗也随之增大，使得接地体不能得到充分的利用，上述两方面因素作用的结果就导致冲击接地电阻具有饱和性，因此在冲击电流的作用下接地体有一个有效长度 。对于输电线路杆塔接地装置，放射形接地体每根的最

大允许长度L_{max}如表2所示。

表2　放射形接地体每根的最大允许长度

土壤电阻率 ρ/(Ω·m)	≤500	≤1 000	≤2 000	≤5 000
最大允许长度 L_{max}/m	40	60	80	100

（3）采用深埋式接地极

如果地下较深处的土壤电阻率较低，可以采用深埋式接地极，在选择埋设点时应注意：尽量选择地下水较丰富或地下水位较高的地方；杆塔附近如有金属矿体，可将接地体插入矿体上，利用矿体来延长或扩大人工接地体的几何尺寸；可利用山岩的裂缝，插入接地极并灌入降阻剂；在冻土区，接地体应埋在冻土层以下。

（4）采用长效降阻剂

在接地体周围施加长效降阻剂是目前最常用的降低杆塔接地电阻的方法。长效降阻剂的电阻率很低，并且埋入地下长期保持湿润，即使土壤干燥，降阻剂也能保持潮湿，采用降阻剂后，相当于增大了接地导体的尺寸，从而具有很好的流散冲击电流的作用。一个接地装置的接地电阻主要由接地装置与土壤的接触电阻R_c和土壤的散流电阻R_D组成。采用一般方法埋接地体时，回填土很难与接地体形成很好的接触，二者之间的接触实际上为很多个点接触，接触电阻R_c较大；采用长效降阻剂后，浆状的降阻剂不但能与接地体很好地接触，也能与土壤及岩石很好地接触，它与接地体和土壤的接触可以看作是面接触，从而可以尽可能地降低接地装置与土壤的接触电阻R_c。长效降阻剂还具有很强的渗透能力，降低了接地体周围土壤的电阻率，改善了土壤的散流性能，从而降低散流电阻R_D。长效降阻剂可分为化学降阻剂、物理降阻剂、树脂降阻剂、稀土降阻剂和膨润土降阻剂等，应选用电阻率低、性能稳定、降阻性能好、不易流失、防腐能力强、无污染且施工方便的降阻剂。

（5）采用非金属接地模块

非金属接地模块近年来才开始用于输电线路杆塔接地装置中，它由导电性和稳定性较好的非金属材料和电解物质组成，模块内置金属极心与塔材相连接。相对于金属接地体来说非金属接地模块成倍地增大了接地极与土壤之间的接触面积，减小了接地极与土壤之间的接触电阻R_c；同时非金属接地模块中电解质渗透到土壤中，也降低了接地体周围土壤的电阻率，改善了土壤的散流性能，从而降低散流电阻R_D。非金属接地模块具有电阻率低、抗腐蚀、使用寿命长和安装方便等特点，特别适用于高土壤电阻率地区、或受地形限制普通接地体埋设不便的特殊地段。

此外，还可以采用换土、伸长接地带、连续伸长接地体、引外接地、空腹式接地装置和导电水泥等措施来降低杆塔的接地电阻。

结束语

输电线路杆塔接地技术对电力系统的安全稳定运行至关重要。衡量杆塔接地装置把直击于杆塔或避雷线的雷电冲击电流引入大地的性能指标是冲击接地电阻R_i，衡量杆塔接地装置把短路电流引入大地的性能指标是工频接地电阻R，并且R_i具有与R不同的冲击特性。在山区等土壤电阻率较高的地区，输电线路杆塔的接地电阻一般较难达到规程要求。影响杆塔接地电阻最重要的因素是土壤电阻率，此外还有设计、施工和运行方面的原因。可以通过利用杆塔的自然接地作用、合理选择接地装置的形式和几何尺寸、采用深埋式接地极、采用长效降阻剂、采用非金属接地模块及其他一些措施来降低杆塔的接地电阻。EA

（收稿日期：2015.08.14）

（编辑：刘群点）

埃森哲公司日前发布《中国能源互联网商业生态展望》

日前，埃森哲公司发布《中国能源互联网商业生态展望》，研究报告预测，到2020年，中国能源互联网的总市场规模将超过9 400亿美元，约占当年GDP的7%。

根据该报告，9 400亿市场规模主要包括以下新增市场：中国在高比例情景下可再生能源相关产业链增加值，物联网在有利政策推进下为能源产业创造的GDP增长量，国内微网市场可预期的大规模增长以及全国在新能源供应和能源效率方面的新增投资。

埃森哲认为，上述增量市场中，可再生能源相关产业链增加值、能源供应与新增能效投资将是最大的两大市场，其市场规模分别超过6 000亿美元和3 000亿美元。