[变电站]

计及变电站故障影响的变电站接地系统设计

文/山西省化工设计院　武　俊

分析了变电站地网电位升高和输电线路接地极电位升高之间的关系，估算了接地极电位和变电站接地网电位之间的相互影响。并对IEEE的接地网设计流程进行了完善，以保证在变电站故障时接地网仍然在安全范围内运行。最后通过实例研究了通过测量接地极电位升高来估算变电站接地网电位升高的模型。

随着人口增长和工业快速发展，需要加快电气设施建设以满足日益增长的电能需求，变电站和输配电线路是电网的关键组成部分。输电线路可以是架空路或地下电缆，而变电站可能位于人口密集区，变电站的接地网、架空线路的接地线以及杆塔接地系统组成了电网的接地系统。变电站故障时，变电站故障电流通过架空线路的接地线传输到杆塔接地系统。变电站和输电线路接地系统要求在故障和雷击时确保网络的安全。研究表明使用先进的接地系统可以控制电气设备故障带来的风险。

许多研究人员已经研究过接地电阻为固定值时的变电站的接地系统，一些学者研究了变电站故障时地电位升高带来的影响，他们指出通过减小接地电阻可以减小地极电位升高。接地电阻减小直接影响变电站地极电位升高以及故障电流分布。

本文提出距离变电站有限长度内的接地极是变电站接地网的有效组成部分，变电站接地网设计时必须加以考虑，否则变电站接地网设计会产生较大的误差。本文还分析了使变电站地电位升高到与其相连的第一杆塔地电位的影响因素。从而使得在设计变电站接地极时，确保系统的安全运行。本文完善了IEEE 80－2000接地设计流程。最后通过实例进行了验证。

变电站接地系统

1．变电站和输电线路接地极

为了确保不同情况下的安全性，已有许多标准、流程等提出了变电站接地系统设计规程，IEEE 80－2000标准被认为是变电站接地系统设计的主要依据。IEEE标准80－2000定义了标准的变电站接地网设计过程，要求计算裂解因数以确定在故障状况下变电站电网电流，然而却不考虑杆塔地电位升高。因此，通常在设计变电站接地网时，忽略了有限长度内的杆塔地极带来的影响。当线路长度满足式（1）时称为无限长线路。

$$l\sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}>2 \tag{1}$$

$$Z_p=Z_pL_s \tag{2}$$

式中，Z_s为架空地线自阻抗（Ω/km），Z_p为接地电阻，L_s为架空导线跨距，l为输电线路的总长度（km）。

所有使式（1）成立的接地极对变电站的接地系统都没有影响。然而，使式（1）不成立的，距离变电站有限距离内的接地极对变电站地电位升高有直接影响。此时无限长架空线路的输入阻抗可由式（3）表示。

$$Z_{OHEW-in}=\frac{Z_s}{2}+\sqrt{Z_sZ_p} \tag{3}$$

式中，$Z_{OHEW-in}$为架空地线输入阻抗（Ω），Z_S为

架空地线平均跨度上的自阻抗（Ω）。

按照现有的标准和研究，变电站裂解因数可由式（4）得出

$$\delta_f = \frac{Z_{\mathrm{OHEW-in}} - Z_{\mathrm{m}}}{Z_{\mathrm{OHEW-in}} + Z_{\mathrm{g}}} \tag{4}$$

式中，Z_{m}为故障相与架空地线的耦合阻抗，Z_{g}为变电站接地网阻抗（Ω）。

根据式（3）和式（4），架空地线输入阻抗和变电站裂解因数与距离变电站有限长度范围内的杆塔接地极直接相关。因此，当杆塔接地极电压很低甚至使得地电位降低时，接地极的接触电压、跨步电压、输入阻抗和变电所的裂解因数都会改变。当接地电阻增加到一定值时，变电站裂解因数增加。这意味着会有更高的电流被注入到变电站地网。

2．变电站的地电位

地极电位升高与变电站地电位升高直接相关。第一个杆塔接地极电流可以用式（5）计算。

$$I_{p1} = \frac{\delta_e Z_{\mathrm{OHEW-in}} - Z_{\mathrm{m}}}{Z_{\mathrm{OHEW-in}} + Z_{\mathrm{p}}} \tag{5}$$

$$\delta_e = \frac{Z_{\mathrm{g}} + Z_{\mathrm{m}}}{Z_{\mathrm{OHEW-in}} + Z_{\mathrm{g}}} \tag{6}$$

由图1可得式（7）

$$EPR_{\mathrm{SUB}} = EPR_{\mathrm{pole-1}} + I_e Z_{\mathrm{s}} - I_f Z_{\mathrm{gm}} \tag{7}$$

式中，Z_{p1}是第一个电极的接地电流；EPR_{SUB}为变电站地电位升高值；$EPR_{\mathrm{pole-1}}$为第一个杆塔地电位升高值；I_e为架空地点返回的故障电流；I_f为故障点电流；Z_{gm}为架空地线和故障相之间的互阻抗（Ω）。

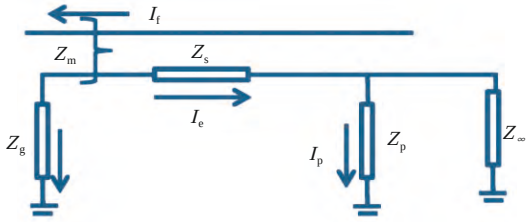

图1　裂解因数等效电路

由式（5）、式（6）、式（7）可得式（8）、式（9）。

$$EPR_{\mathrm{SUB}} = MN \times EPR_{\mathrm{pole-1}} \tag{8}$$

$$MN = 1 + \frac{Z_{\mathrm{s}}\,(Z_{\mathrm{OHEW-in}} + Z_{\mathrm{p}})}{Z_{\mathrm{p}} Z_{\mathrm{OHEW-in}}} \tag{9}$$

式中，MN为变电站地电位升高值与第一个杆塔地电位升高值之比。

可见当接地极的接地电阻增大时，变电站的地极电位升高。

图2为变电站故障时接地电极的电流幅值变化，可见变电站故障时，最高地电位升高值出现在第一个地极上。因此，若变电站故障后第一个地极的电位正常，则其他所有的地电位都处于安全范围内。

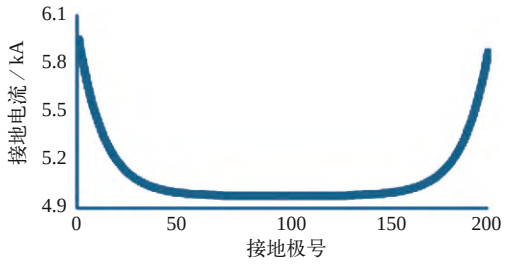

图2　地极电位

变电站接地网设计流程

本文提出的变电站和输电线杆塔电位的升高相互影响，对于变电站的接地网设计具有参考意义。输电线路接地系统要求确保跨步、接触和传输电能时的安全性。许多地极位于人口密集区，保证在变电站故障下电网的安全性尤为重要。根据现有的设计规程，变电站设计时必须考虑到输电杆塔的接地系统。

上文提出了变电站和地极电位升高之间的关系。如果所设计的变电站的接地数据（接地电阻和地极电位升高）可以保证输电线路足够安全，上文给出的接地极和变电站接地网电位之间的关系就可以通过估算获得。例如，设允许的地极电位升高为K V，则变电站故障时保证输电线路杆塔电位在安全范围内的变电站地电位升高最大值为K×MN。如果所设计变电站地电位升高超过该值，则需要对输电线路杆塔的地电位进行重新估算。因此，要求在变电站接地网设计时需要考虑到有限长度内的杆塔的接地网的设计。

基于上述讨论，改进了IEEE 80－2000标准变电站接地网设计流程，如图3所示。位于变电站有限长度内的杆塔接地网构成变电站接地网主体的一部分。估算包括以下几个方面：

（1）输电线路接地系统设计要求降低地极接地电阻、减小变电站地极电流。

（2）减小变电站地极电流可以降低变电站地网结构复杂性。

（3）增加了步骤10.1和步骤10.2，确保在变电站故障时变电站电位和杆塔点位均满足要求。

如果在步骤10.2中的估计值不符合跨步电压和接触电压的要求，则需要重新进行电网设计修改。位于距变电站有限长度内的地网是变电站接

地设计的主体。在步骤5中设计师可以选择修改变电站地极或者杆塔接地电阻以减小地极电位升高。设计时可以根据成本、位置和复杂性的因素来通过改变接地电阻或者改变变电站地网来进行地电位的调整。

除了用于变电站接地网设计外，本文可以根据杆塔电位的升高来计算变电站地电位的变化，本文的结论也可以根据首个杆塔接地极电位升高来计算变电站地电位升高。在许多地方，变电站位于人口稠密的城市，由于空间有限不可以用传统的方法测量变电站地电位升高，此时可以根据杆塔地电位的值来计算变电站接地网的电位，基于提出的新方法，测量第一个或第二个接地极电位升高可帮助估算变电站地电位升高。这个方法对于第一个杆塔距离变电站1～1.5 km的情况非常有用。除此之外，本文提供了变电站地电位升高和沿输电线路地极电位升高之间的直接联系。

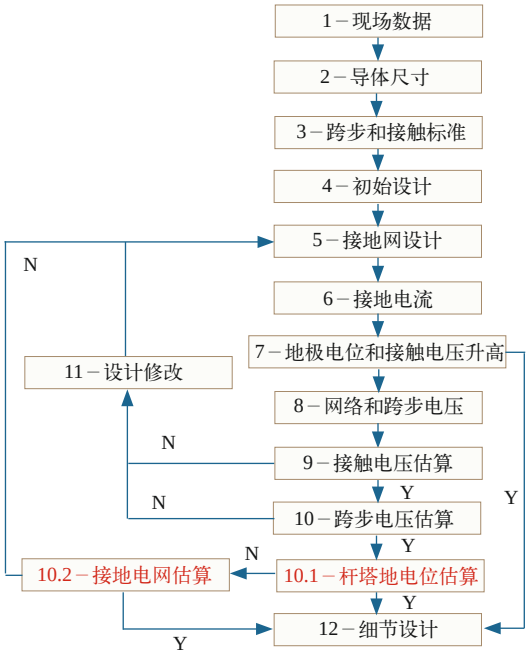

图3　改进的IEEE 80－2000设计流程

算例

设新设计一个变电站位置靠近该城市中心，变电站含一条10 kV架空输电线路供电。变电站的前十个杆塔位于住宅区内，且其余地极位于偏远地区（输电线路长度为10 km且平均跨接长度为100 m），变电站占地40 m×40 m。按照图3所示流程进行变电站设计。初始输入如下：土壤电阻率为20～200 Ω.m；故障相和架空地线之间的距离为3.8 m；允许的接触电压为300 V；架空地线用48芯光纤地线；地极网格由5 m或10 m的电极组成。

根据图3中的步骤4和步骤5，算出变电站地网为0.2299 Ω。图4为变电站接地网结构图。

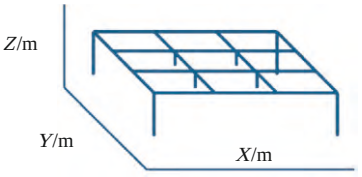

图4　变电站接地网结构

架空地线的自阻抗和互阻抗分别为：

$$z_s = 0.285 + j0.688 \text{ km}$$

$$z_{gw} = 0.0494 + j0.299 \text{ km}$$

根据不同的接地电流可以得出变电站裂解因数。故障电流小于10 kA时计算得出的变电站地电位升高在918 V到1 192 V之间，按照步骤7的地极电位升高高于允许的接触电压。

按步骤8、9和10计算，其接触电压在允许范围内，接触电压为242 V～289 V。基于原有的IEEE设计流程，此时可以进行详细设计。按照之前提出的改进的流程，由于土壤电阻率，参数MN在1.048到1.186之间变化，根据式（9），利用接地电阻算出首个杆塔地极电位升高在77.4 V到113.6 V之间。地极电位升高高于允许的接触电压。可见需要根据接地网电压计算杆塔的电位，从而使得整个系统的安全性满足要求。

若通过在杆塔接地极上增加接地环，使其接地电阻值在1.38 Ω至18.57 Ω之间，则第一个杆塔的地电位升高值在65.9 V～107.9 V之间，使得其电位满足要求，再进行详细设计。

结束语

研究表明按照原有的设计流程可能导致变电站周围的杆塔电位不满足系统安全要求。这些杆塔接地极距离人群比变电站距离人群更近，因此，这些杆塔接地极电位升高风险更高。

通常变电站和输电线路接地网由不同部门和人员进行设计，有可能存在超过安全标准的隐患。位于变电站有限距离内的输电线路接地是变电站接地网的重要组成部分，不可以将其排除在变电站地网设计之外。改进后的流程图确保输电线路接地网在变电站地网设计的考虑范围内。研究案例表明，在变电站设计过程中估算输电线路地极还需要从细节上确保变电站故障情况下全系统的合规性。EA

（收稿日期：2016.06.18）
（编辑：白文亭）