

基于IEEE Std.80—2000和ETAP的石化装置主接地网设计

石油化工装置属于大型复杂装置，需要进行保护接地、雷电防护接地、防静电接地及阴极保护接地等。首先介绍了IEEE Std.80—2000《IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding》的计算流程，应用ETAP中接地网模块对石化某装置进行了接地网的建模、仿真分析和改进优化。同时将优化后的计算结果与GB/T 50065—2011手算结果进行比较。

李宠一/中国石化工程建设有限公司



李宠一/工程师

所谓接地，考虑到工作和安全的需要，常将电力系统或电气装置的某些导电部分，经接地线连接至“地”。接地网为电厂、电气设备及变电站配电间等提供了公共参考电位。利用大地作为接地电流回路元件，在系统正常、事故以及雷击等情况下，将大电流迅速排泄至“地”，控制设备接地处的电位外在允许范围内，从而保证人身和设备安全。

随着涉外项目的增多，我国的国家标准GB及行业标准DL/T往往不能使用，因此有必要熟悉关于变电站设计的国际标准（IEEE标准、IEC标准等）。本文结合工程实例介绍IEEE Std.80—2000《IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding》（以下简称IEEE Std.80），利用基于IEEE Std.80的专业软件ETAP的接地网设计模块对实例进行接地网分析。并将计算结果与基于我国国家标准GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》的计算结果进行比对。

关键词/Keywords

接地·
跨步电压·
接触电压·
ETAP仿真·

关于IEEE Std.80

1. 接地网设计流程

对IEEE Std.80中接地网设计流程的描述。

1) 确定变电站位置、占地面积等初步资料。测量土壤电阻率，确定土壤模型（均匀土壤或非均匀土壤）。

2) 确定接地导体的尺寸 d_c ，最大故障电流以及故障电流持续时间。

3) 确定允许的接触电压及跨步电压。

4) 初步设计接地网，包括整个接地区域的接地环并为设备接地提供方便的接入端等。根据最大接地电流 I_G ，初步估计接地导体的跨距 D 以及接地极的数量和位置。

5) 确定接地网的接地电阻值（均匀土壤）。

6) 确定最大短路故障时流入接地网的电流值 I_G ，其考虑了最恶劣的故障类型及位置、衰减系数及系统将来的扩展。

7) 如果接地网初步设计的电位升低于允许接触电压，设计结束。否则进行第8步。

8) 计算均匀土壤下的接地网接触电动势和跨步电压。

9) 将上步得出的结果与第3步结果比较，若步骤8结果比步骤3结果小，则设计完成，否则需重新确定均压带数量，如缩减接地间隙和增加接地极等，并重复上述计算直到满足要求为止。

接地网设计流程如图1所示。

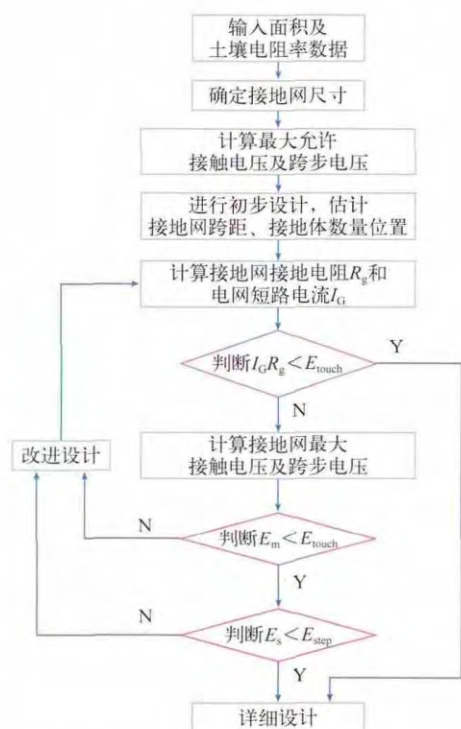


图1 接地系统设计流程

2. 对接地网设计流程的补充

评估一个接地网是否满足要求，除了接地电阻和对地电位，还有接触电压和跨步电压。需要补充的是，通过式（1）确定接地网的接地电阻值，见IEEE Std.80 式（53），即

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 R_2 - 2R_m} \quad (1)$$

式中， R_1 为水平接地体接地电阻， Ω ； R_2 为垂直接地体接地电阻， Ω ； R_m 为水平及垂直接地体的互电阻， Ω 。

R_1 为

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (2)$$

式中， ρ 为土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ； L_C 为水平接地体总长度，m； a' 为 $\sqrt{a \cdot 2h}$ ，其中 h 为埋深， a 为接地体的直径，m； A 为水平接地体所围面积， m^2 ； k_1 、 k_2 为与埋深 h 有关的系数。

R_2 为

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (3)$$

式中， L_r 为单根接地极的长度，m； n_R 为接地极的总个数； b 为接地极的半径，m。

R_m 为

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_2 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (4)$$

根据式（5）计算均匀土壤下的接地网最大接触电动势实际值，见IEEE Std.80 式（80），即

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (5)$$

式中， K_m 为由接地网形状 n 、间距 D 、直径 d 和埋深 h 决定的系数； K_i 为矫正因子，矫正由于引入 K_m 后引起的误差。

根据式（6）计算相同条件下的最大跨步电压实际值，见IEEE Std.80 式（92），即

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \quad (6)$$

式中， K_s 为跨步电压的接地网形状因子，区别于 K_m ； L_s 为针对跨步电压 $L_C + L_R$ 的有效长度，m； L_C 为水平接地网总长度，m； L_R 为接地极总长度，m。

变电站的接地网接触电压及跨步电压不应超过IEEE Std.80上所要求。该标准考虑到人体的重量，在计算允许接触电动势和跨步电动势时，将体重分为了50 kg和70 kg两种。其中接触电压值，分别见IEEE Std.80 式（32）、IEEE Std.80 式（33），即

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

跨步电压值分别见IEEE Std.80 式（29）、IEEE Std.80 式（30），即

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

式（4）～式（7）中 C_s ，见IEEE Std.80 式（27），即

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (11)$$

式中， ρ_s 为表层土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ； h_s 为表层土壤

厚度, m; t_s 为短路电流持续时间, s。

利用ETAP进行接地网计算

1. 案例介绍

ETAP接地网设计程序分为IEEE法和有限元法, 两者皆能进行接地体的接触电压、跨步电压、接触电阻和对地电压的计算, 各有强项。但IEEE法可以优化水平和垂直接地体, 有限元法可以计算出整个接地网区域内各点接触电压及跨步电压, 绘制3D图谱。

应用ETAP接地网设计模块对某石油化工装置及其装置联合变电所进行接地网的分析。该变电所有8个10 kV进线, 其中4个 3×185 电缆, 供电7 500 kW; 4个 3×240 电缆, 供电10 000 kW。8台10/0.4 kV变压器将低压负荷分成8段, 采用单母线分段的方式。其中4套1 600 kV·A变压器, 2套1 250 kV·A变压器, 2套2 500 kV·A变压器。该变电所10 kV侧经小电阻接地。

接地网为 240×127 m, 根据GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》中附件D表D所述, 采用均压带非等间距布置。装置实际采用的接地干线材料是纳米碳复合防腐热镀锌扁钢— 50×5 。土壤为非均匀土壤, 上层电阻率为 $260 \Omega \cdot \text{m}$, 深度约为3 m, 下层电阻率为 $195 \Omega \cdot \text{m}$ 。根据国标GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》4.3.2, 为了减小接触电动势等对人身伤害, 在配电装置接地网边缘经常有人出入的走道及现场有操作需要的设备处敷设鹅卵石20 cm。

2. 模型建立

根据上述所描述案例, 应用ETAP的接地网系统模块, 对土壤和接地网进行建模。建模如图2所示。

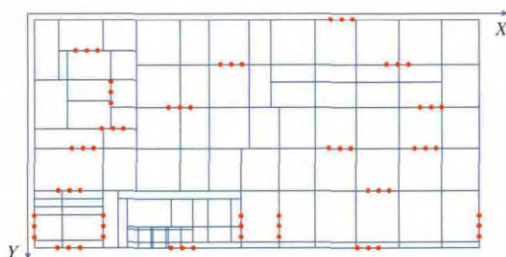


图2 某装置及变电所接地网模型图

3. 分析计算

ETAP的接地网模块是依托于IEEE Std.80来计算的。本例中应用有限元法进行仿真计算。下文中举出IEEE Std.80和GB/T 50065—2011的计算对比。

4. 输出报告

如图3所示ETAP接地网模块输出报告显示最大接触电压超过允许限值。为了降低接触电压, 有如下几种方法可行: ①加密接地网格。②增大表面土壤电阻率。③在增大表面土壤电阻率的情况下, 可适当增加表面大土壤电阻率土壤的厚度。④改进装置电网, 缩短接地故障时间。本例采用加密接地网格。如图4所示, 经计算接触电压和跨步电压均符合要求。总接地材料长度为4 741 m。图5和图6分别为接触电压和跨步电压的三维模型, 其中还包含了过电压限制的对比。

接地网总结报告

R _g 接地 电阻 ohm	GPR 接地 电位升 Volts	最大接触电压					最大跨步电压				
		允许值 Volts	计算值: Volts	计算值: %	对应点 (m)		允许值 Volts	计算值: Volts	计算值: %	对应点 (m)	
					X	Y				X	Y
0.535	4957.8	1237.8	1331.9	107.8	232.7	7.8	4052.8	318.6	7.9	240.00	0.00
总故障电流		8.000 kA		反射因子 (K):		-0.812					
最大接地网电流:		9.270 kA		表层校正因子 (Cs):		0.835					
				消耗因子 (Df):		1.159					
警告:											
最大接触电压超过允许限值											

图3 加密前接地网总结报告

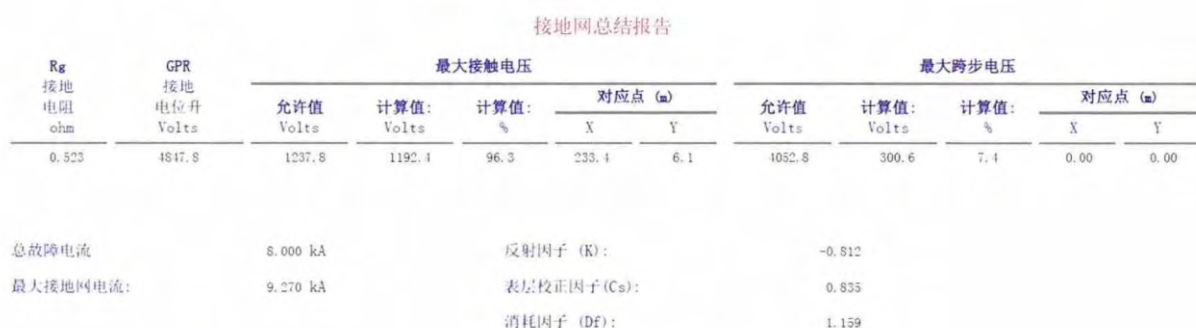


图4 加密后接地网总结报告

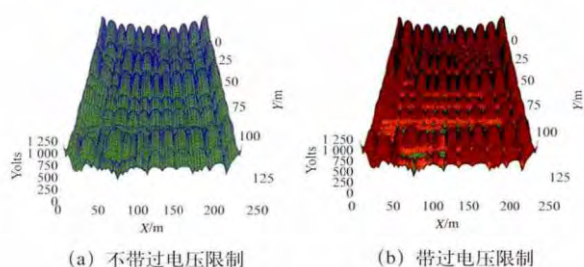


图5 接触电压三维模型图

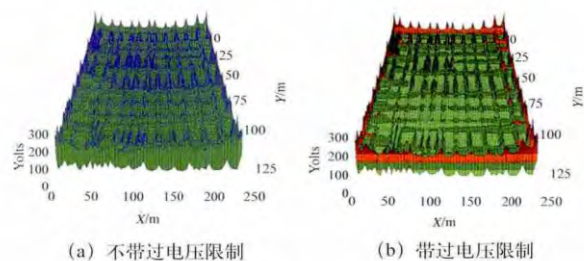


图6 跨步电压三维模型图

5. 结果分析与比较

通过图5和图6的模型图可以清楚地得出,除了装置边缘和四角,该装置的接地网接触电压和跨步电压都小于极限值。就装置布置来看,边缘和四角无电气设备,因此人身触电几率不大。根据GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》,除了在接地网边缘有人出入的走道处应铺设沥青路面、鹅卵石等,在现场有需要操作的设备处铺设沥青、绝缘水泥或鹅卵石外;外边缘各角还应做成圆弧形,圆弧半径不宜小于均压带间距的1/2。

ETAP的接地网模块基于IEEE Std.80,计算结果与应用行业标准GB/T50065—2011的计算结果进行对比,如下表所示。可以看出,两种计算结果

表 应用IEEE Std.80与GB/T 50065—2011计算的不同结果

计算标准	接地电阻升 (GPR) /V	最大接触电压/V	最大接触电压限值/V	最大跨步电压/V	最大跨步电压限值/V	接地电阻/ Ω
IEEE Std.80	4 847.8	1 192.4	1 237.8	300.6	4 052.8	0.524
GB/T 50065—2011	6 247.9	1 227.5	1 585.5	347.2	5 157.8	0.674

接近,但IEEE Std.80的计算结果更为保守。由两组数值也可看出,用软件来进行接地网设计计算来代替传统的手动计算是完全可行的。

结束语

ETAP接地网模块通过土壤模型的建立、接地网模型的建立,能高效准确得到接地网每个点的电位分布、接触电压、跨步电压及接地电阻等效,从而对接地网进行评估、优化和改进。

参考文献

- [1] DL/T 621—1997 交流电气装置的接地[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [2] GB/T 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [3] 周建,路平,王锋,等.采用IEEE标准设计发电厂升压站接地网的研究[J].华东电力,2010(8).

(收稿日期:2014-10-21) EA