

石化装置接地电阻计算方法研究

在电气工程设计中,接地系统的好坏直接关系到整个电力系统安全可靠等级,而接地电阻的大小是判断一个接地系统电气性能是否合格的最主要依据之一。通过分析GB/T 50065—2011、IEEE Std.80—2000以及IEEE 142—2007标准中不同接地电阻计算方法,并通过计算结果进行比较,利用ETAP仿真软件加以验证,从而了解各个标准规范中关于接地电阻计算方法的区别及其各自使用范围。

曾 睿/中国石化工程建设有限公司

0 引言

为了维护电力系统安全可靠运行,保障电气设备与运行工作人员人身安全,电力系统中变电站以及许多电气设备的外壳都需要通过接地极直接或间接与大地相连。根据不同的接地要求,可以分为防雷接地、工作接地和保护接地三种类型。接地系统的好坏直接关系到整个电力系统安全可靠等级。衡量接地系统的标准包括接地电阻值、跨步电阻、接触电阻、均衡点位、泄流能力和抗腐能力等,而接地电阻的大小是判断一个接地系统电气性能是否合格的最主要依据之一,其数值反映了接地装置对地电压与通过接地极流入地中电流的比值。接地电阻越小,流入大地的电流越大,越能保障电力系统中电气设备的安全。所以,对于接地网的接地电阻值在电力系统的规划设计中有着严格限制,以保证电力系统的安全运行。

在我国电气工程设计中,接地电阻的计算长期以来采用的是GB/T 50065—2011中的公式。在这些推荐公式中,很多参数是基于我国地理环境的经验参

数。随着经济形势的发展,国外工程项目不断增多,这些国家的地理环境与我国相差很大,如果仍采用GB/T 50065—2011标准中的公式进行计算,必定将导致计算结果与实际测量结果产生较大偏差。所以,为了达到国际电气工程的设计要求,同时考虑到其他国家业主对IEEE标准的认同,下面将分别分析GB/T 50065—2011、IEEE Std.80—2000以及IEEE 142—2007标准的不同接地电阻计算方法。

1 GB/T 50065—2011接地电阻计算公式

1) 复合接地网接地电阻简易计算方法为

$$R = 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \frac{\rho}{r} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (2)$$

从上述公式可以看出,影响接地电阻值大小的只有两个参数,接地电阻值与土壤电阻率 ρ 成正比,与接地网面积 S 成反比。

2) 水平接地极为主边缘闭合的复合接地网的接地电阻可利用以下公式计算

$$R_n = \alpha_1 R_c \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \left(3 \ln \frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2 \right) \frac{\sqrt{S}}{L_0} \quad (4)$$

$$R_c = 0.213 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1+B) + \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{S}{9hd} - 5B \right) \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{1 + 4.6 \frac{h}{\sqrt{S}}} \quad (6)$$



曾 睿/助理工程师

关键词/Keywords

复合接地网·
接地·
计算方法·
ETAP·

式中, R_n 为任意形状边缘闭合接地网的接地电阻, Ω ; R_e 为等效(等面积、等水平接地极总长度)方形接地网的接地电阻, Ω ; S 为接地网总面积, m^2 ; d 为水平接地极的直径, m ; h 为水平接地极的埋设深度, m ; L_0 为接地网的外缘边线总长度, m ; L 为水平接地极的总长度, m 。

从上述公式可以看出, 系数 α_1 大小与 $L_0/\sqrt{S}$ 比值有关, 可将 α_1 看作复合接地网的形状系数, 因此, 复合接地网的接地电阻值实际为等效电阻值乘以形状系数而得。其次, 影响等效电阻 R_e 大小的因素有参数土壤电阻率 ρ 、接地网面积 S 、水平接地极埋设深度 h 、水平接地极的直径 d 、接地网的外缘边线总长度 L_0 以及水平接地极的总长度 L 。所以, 若要改变接地电阻值的大小, 可以从以上参数入手考虑, 例如, 当接地网面积很大时, 面积 S 对接地网影响要远大于其他参数, 此时, 可通过增大或减小接地网面积, 达到调整接地电阻值大小的目的。

值得注意的是GB/T 50065—2011常用公式仅考虑水平接地网的影响, 忽略了垂直接地极对复合接地网的影响, 因此此公式主要适用于水平接地极的接地电阻值计算。式中通过引入了形状修正系数, 可在计算过程中进行适当近似处理, 当在复合接地网络中既存在水平接地极又存在垂直接地极时, 由于垂直接地极的总长度在整个接地网络中占得比重很小, 几乎可以忽略时, 也可以运用上式进行近似计算; 但当垂直接地极在复合接地网所占比重较大时, 此公式将会产生较大误差, 具有一定的局限性。

2 IEEE Std.80—2000

此标准规范提出了变电所接地网设计与计算的方法, 主要适用于常规户外或室内变电所的相关设计, 下列计算方法为该规范推荐接地电阻计算方法所用公式。

均匀土壤中复合接地网接地电阻的计算公式如下。

1) 简易公式

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (7)$$

式中, ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

2) 常用公式

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (8)$$

式中, A 为接地网总面积, m^2 ; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; h 为埋深; L_T 为水平接地极与垂直接地极之和。

从上述公式可以看出, 影响接地电阻值大小的只有两个参数, 接地电阻值与土壤电阻率 ρ 成正比, 与接地网面积 A 成反比。

由上式公式得出结论是, IEEE Std.80—2000推荐的常用公式考虑到了垂直接地极对复合接地网的影响。但是, 此公式忽略了水平接地极与水平接地极之间的屏蔽作用, 水平接地极与垂直接地极之间的屏蔽作用, 以及垂直接地极与垂直接地极之间的屏蔽作用。因此, 用此公式计算出的复合接地网接地电阻值往往比Schwarz公式计算出的电阻值偏大, 计算结果较为保守。但是, 由于常用公式计算较简单, 因此, 在实际项目中, 若用常用公式计算出的结果满足规范要求, 则可初步判断所计算的接地电阻大小满足设计要求。

3) Schwarz公式

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (11)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (12)$$

式中, R_1 为水平接地网的接地电阻, Ω ; R_2 为垂直接地网的接地电阻, Ω ; R_m 为接地网中水平接地极与垂直接地极之间相互作用后的接地电阻, Ω ; A 为接地网总面积, m^2 ; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; L_C 为水平总长度, m ; $a' = \sqrt{a} \cdot 2h$, $2a$ 为接地体直径, h 为埋深, m ; L_r 为单个垂直接地极长度, m ; n_R 为垂直接地极的总个数; b 为垂直接地极的半径, m ; k_1 、 k_2 为与埋深 h 有关的系数, IEEE 80—2000中图25a和图25b所得的经验参数。对于 $h=0$,

$k_1 = -0.04x + 1.41$, $k_2 = -0.15x + 5.50$; 对于 $h = \sqrt{S}/10$, $k_1 = -0.05x + 1.20$, $k_2 = -0.10x + 4.68$; 对于 $h = \sqrt{S}/6$, $k_1 = -0.05x + 1.20$, $k_2 = -0.05x + 4.40$ 。

相对于GB/T 50065—2011, IEEE Std.80—2000接地电阻计算方法考虑到了垂直接地极的影响, 其中Schwarz公式更是引入了水平接地极与垂直接地极之间的相互影响的相关参数, 使计算结果更为准确。从上述公式可以看出, 接地电阻

R_1 、 R_2 和 R_m 均与参数 k_1 、 k_2 有关。IEEE标准中 k_1 、 k_2 的取值是根据曲线拟合后的经验公式计算而得, 在三个不同埋深条件下, 取不同的值。所以, k_1 、 k_2 的取值的准确性将对计算接地电阻值有很大的影响。

3 IEEE 142—2007接地电阻计算公式

在IEEE 142—2007中, 计算接地电阻常用公式如表1所示。简易公式为 $R_g = \rho/298$ 。

表1 接地电阻常用公式

•	One ground rod length L , radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
••	Two ground rods $s > L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{3s^4} \dots \right)$
••	Two ground rods $s < L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
—	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
└	Right-angle turn of wire length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Y	Three-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
+	Four-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$

IEEE 142—2007推荐公式中, 只要针对单个不同形状接地体求取其接地电阻, 此公式未能考虑水平接地体与垂直接地极之间的屏蔽作用影响, 也未能提出在一个复合接地网中, 此公式的有效性, 并且在标准第二部分以及第四部分中有提到, 当计算变电所接地电阻时, 应参考IEEE Std.80—2000所推荐的具体公式。

4 计算结果比较

通过比较上述三个标准推荐公式, 可以看出, 相对于GB/T 50065—2011的计算公式, IEEE标准公式中, 增加了垂直接地极相关参数的计算, 若垂直接地极在总接地长度所占比例较大时, IEEE公式仍具有较高的准确度。比较IEEE Std.80—2000与IEEE 142—2007两个标准中接地电阻计算公式可以看出, IEEE Std.80—2000 Schwarz

公式中考虑到了水平接地极与垂直接地极之间的相互屏蔽作用, 引入参数 R_m , 计算结果更贴近实际测量值, 因此在国际设计项目中通常采用此标准来计算接地电阻大小。

以下是对某石油化工装置进行接地网的接地电阻值计算, 接地网面积为 $150 \text{ m} \times 55 \text{ m} = 8\,250 \text{ m}^2$, 选用 $\phi 5/8$, 长3 m的接地极, 装置实际采用的接地干线材料是 95 mm^2 裸铜线, 埋深为0.5 m, 土壤电阻率约为 $82.3 \Omega \cdot \text{m}$, 如表2所示。

通过表2可以看出, 三种方法计算结果相差较小。GB/T 50065—2011与IEEE Std.80—2000不同公式计算结果相差较小, 分布更稳定, IEEE Std.80—2000中的计算公式与GB/T 50065比较, 计算结果更为保守。因此在工程设计项目中, 特别是国外项目中, 推荐使用IEEE Std.80—2000中的计算公式, 应根据具体项目的不同, 选取不同

表2 不同方法接地电阻计算结果

(单位: Ω)

标准	GB/T 50065—2011		IEEE Std.80—2000		IEEE 142—2007		
公式	简易公式	常用公式	简易公式	常用公式	Schwarz	简易公式	复杂公式
R_g	0.453	0.457	0.4	0.487	0.315	0.276	0.198

公式。

5 ETAP仿真

利用ETAP进行接地网系统的接地电阻值计算,主要有四种计算方法:有限元算法、IEEE 80—2000、IEEE 80—1986和IEEE 665—1995。在石化设计过程中,主要用到的是有限元算法、IEEE 80—2000算法,两者皆能计算接地网的接触电压、跨步电压和接地电阻等。但两者主要区别在于,有限元法可以计算出整个接地网不同点的接触电压和跨步电压,并绘制其3D图形;IEEE 80—2000算法可以对平行的垂直接地极和水平接地体进行优化。在本文中,采用有限元法进行仿真计算。在这里,推荐一种更为方便的方法,可以直接将CAD中的图形导入到ETAP中去,减少了在ETAP中重新建构模型的工作,而且操作简单,减少误差。

具体操作步骤如图1所示。

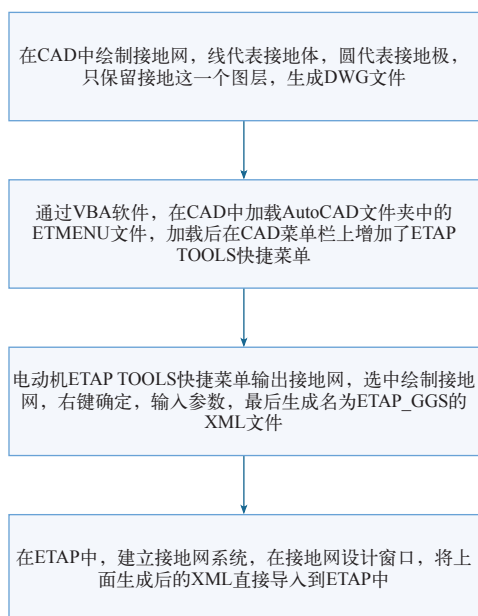


图1 将CAD中图形导入ETAP软件过程

下面将运用ETAP 14.0软件对该项目接地系统

进行仿真计算。按照上述步骤操作后,将CAD中的接地网模型直接导入至ETAP中,生成的接地网模型及其计算结果,如图2和图3所示。

从ETAP仿真结果报告可以看出,用此软件计算出的接地电阻值与用公式直接计算出的结果相距甚微。

6 结束语

综上所述,IEEE Std.80—2000推荐的计算接地电阻的方法更具有可行性,具有更高的准确性及严格性,在国外工程设计中,需要计算复合接地网接地电阻值时,可首先考虑用此规范中推荐的公式,当需要进行简单校验时,可直接采用此规范中的常用公式,当需要准确计算接地电阻值时,推荐用Schwarz公式,并用ETAP软件进行仿真校验。

在国外很多项目中均应用ETAP软件对项目接地网系统进行校验,并计算出接地电阻值、接触电压及跨步电压等参数,得到了国外业主的认可。这样不仅可以更加高效、准确地对接地网系统进行评估、优化,而且使炼化厂电力系统的运行更加安全可靠。需要特别指出的是,在接地电阻满足设计规范的同时,尚应校验接地装置的电位、跨步电压和接触电压是否满足要求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] IEEE Std.80—2000 IEEE guide for safety in AC substation grounding [S].
- [3] IEEE Std.142—2007 IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems [S].
- [4] 刘纯. 基于IEEE Std.80—2000变电所接地网设计

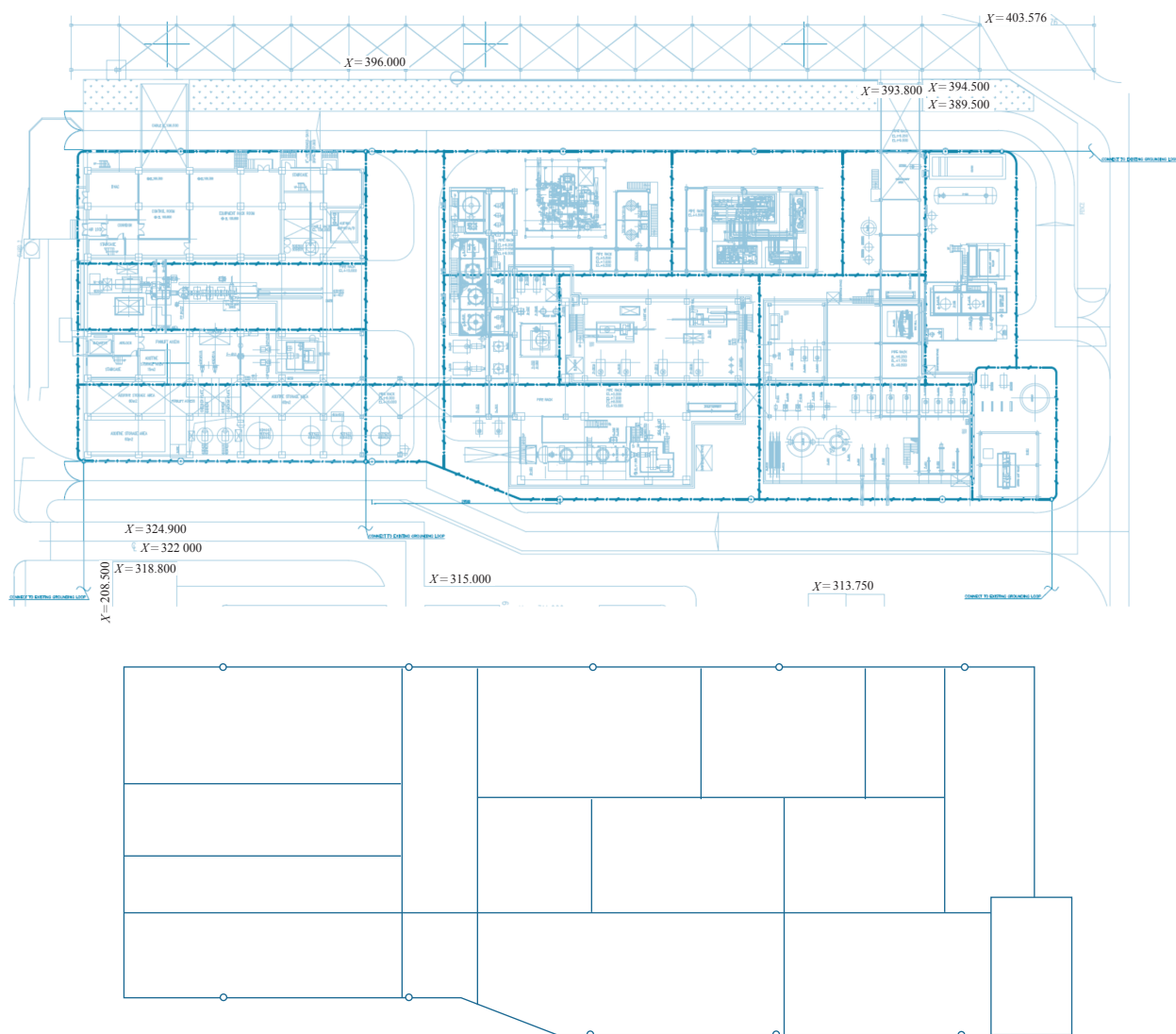


图2 接地网模型

Ground Grid Summary Report

Rg Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Maximum Touch Potential					Maximum Step Potential				
		Tolerable Volts	Calculated		Coordinates(m)		Tolerable Volts	Calculated		Coordinates(m)	
			Volts	%	X	Y		Volts	%	X	Y
0.419	420.7	735.3	420.7	57.2	114.9	617.7	2 449.2	420.7	17.2	100.00	559.70

图3 ETAP仿真结果报告

简析[J]. 水运工程, 2013, 10(10): 51-55.

[5] 陶佳燕. 基于GB和IEEE标准的复合接地网接地电阻影响因素分析[J]. 电气应用, 2014, 33(22): 72-77.

[6] 司文荣, 傅晨钊, 卞晓亮, 等. 变电站接地网缺陷诊断无损评价方法综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(8): 14-21.

(收稿日期: 2016-07-17) **EA**