

基于IEEE标准的发电厂接地设计计算

结合IEEE标准对接地设计的要求, 将其内容进行了提炼、分析和论述。从接地导体的选择、土壤模型的建立、短路电流的分析及接地网的设计与校验4个方面对接地计算进行阐述, 并对相关计算模型和公式进行推导。分析总结出一套具有实际工程应用价值的接地设计方法。最后, 采用软件ETAP 7.5接地模块对某涉外工程进行接地网设计。对今后发电厂接地设计有一定的指导和借鉴作用。

潘淑杰/国核电力规划设计研究院



潘淑杰/工程师

关键词/Keywords

IEEE标准 ·
接地系统 ·
土壤电阻率 ·
分流系数 ·

0 引言

目前, 国外工程和引进技术工程日益增多, 而国内设计单位在进行发电厂接地设计时执行的标准为国标GB/T 50065—2011和行标DL/T 621—1997。由于设计方法和理念存在差异, 采用国内规程规范进行接地设计很难在上述工程设计中得到认可。深入理解IEEE与接地计算相关的规程规范并总结出一套适用的计算方法势在必行。在对IEEE相关规程规范进行研读之后, 本文将从接地导体的选择、土壤模型的建立、短路电流的分析及接地网的设计与校验4个方面对接地计算进行阐述, 并对相关计算模型和公式进行推导分析。得出应用于涉外和引进技术工程接地设计计算的方法。最后, 用实际工程进行了验证。

1 选择接地导体

根据文献[1], 计算接地导体截面积的公式为

$$S = 0.507 I_G K_f \sqrt{t_c} \quad (1)$$

式中, S 为导体截面积, mm^2 ; I_G 为计算接地导体截面积使用的短路电流, kA ;

K_f 为材料参数; t_c 为故障清除时间, s ; 0.507 为量纲换算系数。

$$I_G = I_{\text{fault}} D_f C_p \quad (2)$$

式中, I_{fault} 为流经接地导体的最大不对称短路电流的周期分量; D_f 为直流衰减系数; C_p 为未来发展因数。

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{t_a}{t_c} \times \left(1 - e^{-\frac{2t_c}{t_a}} \right)} \quad (3)$$

式中, t_a 为直流偏移的时间常数, s , $t_a = X/(\omega R)$ 。

因为接地导体在运行周期内会受到腐蚀, 所以在计算接地导体截面积时需要留有一定裕度, 一般在根据式(1)计算之后选择大一级的截面积。

2 分析土壤电阻率, 建立土壤模型

土壤电阻率的测量按照专业分工属于勘测专业的工作范围。土壤电阻率的分析和土壤模型的建立由电气专业来完成。土壤电阻率模型的建立是一项很复杂的工作, 受土壤类型、测量深度、季节和气候变化等多种因素的影响。因此, 好的土壤电阻率模型只是对实际土壤的估计, 并非完美匹配。针对不同的土壤情况和要求可建立单一、双层或多层土壤模型。

若土壤电阻率随测量深度变化较大, 用单一土壤电阻率模型不能满足要求, 则采用双层土壤电阻率的土壤模型。考虑到经济和技术条件, 在大多数情况下采用双层土壤模型来模拟实际情况足以满足设计一个安全接地网的要求, 所以在此不再讨论多层土壤模型。

以下详细介绍双层土壤模型的建立方法。双层模型包括有限深度的上层土壤和无限深度的下层土壤。设 ρ_1 为上层土壤电阻率, $\Omega \cdot m$, ρ_2 为下层土壤电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

采用Sunde图形法建立双层土壤电阻率模型, 其具体步骤如下^[2]。

1) 根据土壤电阻率的测量结果, 绘制土壤视电阻率 ρ_a 的曲线。其横坐标为探针间距 a , 纵坐标为土壤视电阻率 ρ_a 。

2) 根据步骤1) 得到的土壤视电阻率曲线, 估算上层土壤电阻率 ρ_1 (ρ_1 为当探针间距 a 较小时的 ρ_a 值) 和下层土壤电阻率 ρ_2 (ρ_2 为当探针间距 a 较大时的 ρ_a 值)。

3) 确定 ρ_2/ρ_1 , 根据 ρ_2/ρ_1 的值在Sunde图中选择一条曲线或插入一条新曲线。

4) 在所选的 ρ_2/ρ_1 曲线上, 选择合适的纵坐标 ρ_a/ρ_1 值。

5) 根据步骤4) 选择的 ρ_a/ρ_1 , 从Sunde图的横坐标上读取对应的 a/h 值。

6) 由步骤4) 中选择的 ρ_a/ρ_1 以及 ρ_1 来确定 ρ_a 。

7) 根据步骤1) 确定的土壤视电阻率曲线和步骤6) 中确定的 ρ_a 值, 读取相应的探针间距 a 的值。

8) 根据步骤5) 确定的 a/h 值和步骤7) 确定的 a 值, 计算上层土壤的深度 h 。

这样, 确定了上、下两层土壤电阻率值和深度就得到了双层土壤模型。

分析如下。

步骤1)。对土壤视电阻率 ρ_a 曲线可利用Excel进行多项式或对数等函数的拟合, 得到拟合曲线的方程。以便于确定下层土壤电阻率。

步骤2)。若土壤电阻率数据不充分, 可将土壤视电阻率曲线向两端延伸以获得这些极限电阻率值。

ρ_a/ρ_1 值的大小对于计算结果基本没有影响, 若选择介于1和 ρ_2/ρ_1 之间的整数值, 更便于从曲线上读数。

值得指出的是, 在利用ETAP 7.5接地模块计算中, 土壤电阻率模型的建立是手动输入的, 也就是说对于双层土壤模型必须计算出上层土壤深

度, 手动填入该值才能计算。土壤模型的建立在接地计算中处在一个基础的位置上, 非常重要, 现阶段掌握的方法是Sunde绘图法, 另外还可以应用计算机程序来分析。

3 分析短路电流, 计算分流系数

对短路电流进行分析之前, 应该先明确以下概念。

接地网最大入地电流 I_g , 即接地故障电流中经接地网流入地中的电流分量最大值, 供接地网设计使用; 接地网入地对称电流 I'_g , 即接地网入地电流的周期性分量。

故障电流分流系数 S_f , 即接地网入地对称电流 I'_g 与接地故障电流周期分量 I_{fault} 的比值。

因此

$$I'_g = S_f I_{fault} \quad (4)$$

$$I_g = I'_g D_f C_p \quad (5)$$

众所周知, 接地网最大入地电流 I_g 是计算地电位升、跨步电压和接触电压的前提, 而 $I_g = I'_g D_f C_p = S_f I_{fault} D_f C_p$ 。式中, I_{fault} 、 D_f 和 C_p 均为已知。问题的关键就在于如何计算分流系数 S_f 。

获得分流系数的方法有多种, 文献[3]、文献[4]分别有所介绍。依据文献[2], 采用Garrett and Patel's曲线计算分流系数 S_f 。首先确定出线接地电阻 R_{tg} 及馈线接地电阻 R_{dg} ; 然后计算故障电流近端分流量和远端分流量所占的比例; 最后根据系统的出线数量、馈线数量以及接地网电阻 R_g , 通过查IEEE 80—2000 Appendix C中FigureC.1~FigureC.22合适的曲线, 可大致估算出分流系数 S_f 。

对各输入参数值的分析如下。IEEE 80—2000 Appendix C中FigureC.1~FigureC.22曲线的出线接地电阻 R_{tg} 及馈线接地电阻 R_{dg} 有15 Ω 及100 Ω 两种数值。对于发电厂来说, 不考虑有馈线的情况, 由于出线电阻100 Ω 的情况下得到较大的分流系数 S_f , 为了给接地网的设计留出裕量, 故选择出线接地阻抗 $R_{tg} = 100 \Omega$, 没有馈线的曲线。

值得指出的是, 利用Garrett and Patel's经验曲线计算分流系数时, 考虑了各种中性点接地方式

(包括了文献[3]、文献[4]采用的两种中性点接地方式)。

4 设计并校验接地网

接地体的水平均压带可以等间距布置也可以不等间距布置^[5]。

当等间距布置时,由于电流的趋肤效应,中心的网孔电压通常小于边缘的网孔电压;采用中间稀疏边缘密集的不等间距布置,既可以节省投资又能达到均压的效果,但是不等间距法计算和优化存在困难。因此可以根据工程的实际情况选用不同的布置方法。

在接地导体的布置上,文献[2]虽然对等间距布置和不等间距布置都作了介绍,但具体的接地电阻计算是根据等间距接地网来计算的。

如上所述,运用ETAP 7.5软件接地模块的有限元算法,对接地网的地电位升高以及跨步电位差和接触电位差进行校验。

5 工程实例

以某涉外工程为例,采用ETAP 7.5软件接地模块的有限元算法进行接地计算。

5.1 计算接地导体截面积

输入条件: $I_{\text{fault}}=42.60 \text{ kA}$, $X/R=40$, $t_c=0.5 \text{ s}$ 。
取未来发展因数 $C_p=1$,采用裸铜绞线作为主接地网的接地材料。

计算结果: $t_a=X/\omega R=40/100\pi=0.127$, $D_f=1.12$, $I_G=I_{\text{fault}}D_fC_p=42.60 \times 1.12 \times 1 \text{ kA}=47.71 \text{ kA}$ 。

根据IEEE 80—2000 11.3.1.2,对于裸铜绞线 $K_f=7$ 计算导体截面积为

$$\begin{aligned} S &= 0.507 I_G K_f \sqrt{t_c} \\ &= 0.507 \times 47.71 \times 7 \times \sqrt{0.5} \text{ mm}^2 \\ &= 119.73 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

考虑腐蚀影响,接地导体截面积选择大一级,取 150 mm^2 。

5.2 建立土壤模型

根据1[#]、2[#]机汽机房、锅炉房、变压器区域和辅助车间地面岩土视电阻率测量结果表,对测得

的26个测点的土壤电阻率在不同深度取均值,如下表所示。

表 不同测点的土壤电阻率

(单位: $\Omega \cdot \text{m}$)

极距 测点	1	2	3	4	5
DC	33.91	38.34	40.58	41.94	44.25
极距 测点	7	10	15	20	30
DC	47.34	49.80	77.69	94.66	117.11

根据上表得到土壤视电阻率 ρ_a 曲线并利用Excel进行3阶多项式拟合,如图1所示。

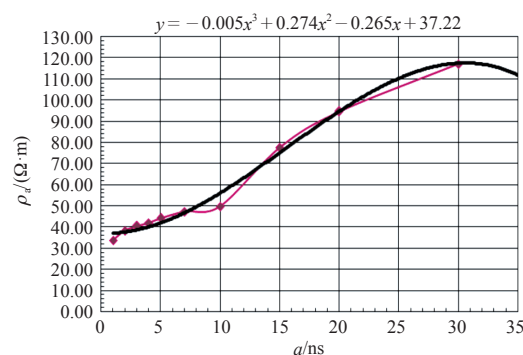


图1 土壤视电阻率 ρ_a 曲线

根据Sunde图形法,经分析计算,最后得到双层土壤电阻率模型为:上层土壤电阻率 $\rho_1=40$,下层土壤电阻率 $\rho_2=120$,上层土壤深度 $h=7.67 \text{ m}$ 。

5.3 计算分流系数

输入条件:根据不对称短路电流计算结果,其近端分流量和远端分流量所占的比例分别为29%和71%,故选择25%Local/75%Remote分流系数曲线。

建立接地网模型后,根据ETAP软件计算结果,接地电阻为 0.11Ω 。出线数量为4回。

根据IEEE 80—2000 Appendix C中的Figure C.18可查得接地网的分流系数约为 $S_f=60\%$ 。

5.4 设计校验接地网

将1[#]、2[#]机汽机房、锅炉房、变压器区域及辅助车间用接地导体相连,垂直接地极采用长 2.44 m 、直径为 1.72 cm 的镀铜钢棒,主接地网如图2所示(开关站接地不属于本次设计范围,不予考虑)。

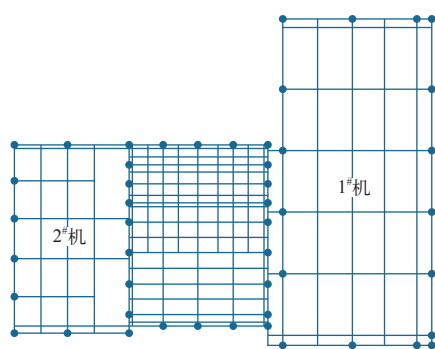


图2 1#、2#机接地网布置图

运用ETAP软件接地模块的有限元算法对接地网的地电位升高以及跨步电位差和接触电位差进行校验，分析如下：汽机房、锅炉房底部的接地网，无须校验跨步电位及接触电位。由于发生大故障电流接地的区域集中在主变压器高压侧和开关站内，故接触电位主要针对这两个区域进行校验。由于开关站不属于本次设计范围，故仅校验变压器区域。

得到的简要计算结果如图3所示（出于保守考虑，接触电位、跨步点位的允许值按体重为50 kg的人校验）。

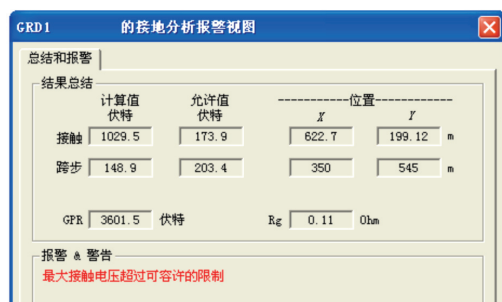


图3 计算结果

由图3可见，整个区域内的跨步电位满足要求。接触电位最大值为1 029.5 V，超过允许值，接触电位最大值的坐标（X，Y）为（622.7，199.12）。

由图4可知，此最大值点出现在升压站区域。

升压站区域不属于本次设计范围，因此没有设置接地网、变压器及汽机房所在区域，其接触

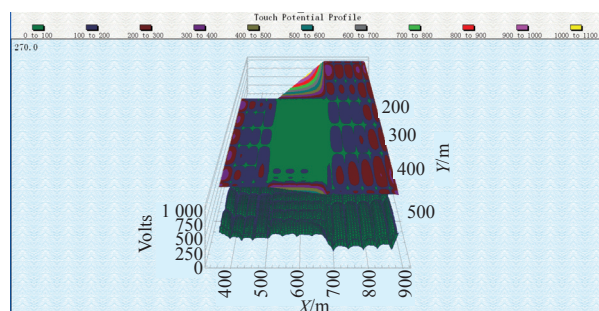


图4 接地网接触电压示意图

电位计算值均在100 V以内，小于接触电位的允许值173.9 V。因此，此接地网满足要求。

6 结束语

在对IEEE接地计算相关规程进行详细研读之后，结合自身的理解，总结出一套应用于涉外和引进技术工程的接地设计计算的方法。从接地导体的选择、土壤模型的建立、短路电流的分析及接地网的设计与校验4个方面对接地计算进行阐述。用ETAP 7.5的接地模块对实际工程接地网进行设计计算。实际工程的计算结果表明，该方法模型建立更符合实际，结果比传统算法更准确。所归纳的计算方法具有一定的应用和推广价值。

参考文献

- [1] IEEE 665—1995 Guide for Generating Station Grounding [S].
- [2] IEEE 80—2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding [S].
- [3] GB/T 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2011.
- [4] DL/T 621—1997 交流电气装置的接地 [S]. 北京：中国电力出版社，1997.
- [5] 康健，潘淑杰. 发电厂接地计算中关于入地短路电流的探讨 [J]. 电气应用，2011，30（22）：78-81.

（收稿日期：2015-05-18） EA