

基于 IEEE Std 80 与 GB/T 50065 的 变电站接地差异分析

张 顺 许 斌 曹 亮

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司 湖北 武汉 430071)

摘 要: 随着中国电力设计企业在海外变电工程业务的逐年增多,接地网设计标准的差异在国际电力工程建设的执行过程中成为日益凸显的问题。在分析比较了 IEEE std 80 和 GB/T 50065 的基础上,给出了两本规范在接地导体的选择、接地判据侧重点以及分流系数计算方法上存在的异同点。同时详细分析了接地导体截面选择、接地电阻、接触电势、跨步电压等在计算结果上存在差异的内部原因。以海外某变电站接地网设计为例,详细比较了以上差异,为国内电力工程师在进行国外变电站接地网设计时提供标准选择方法。

关键词: 接地导体; 接地电阻; 跨步电压; 接触电势; 分流系数

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0001-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.001

Difference Analysis of Substation Grounding Based on IEEE Std 80 and GB/T 50065

Zhang Shun , Xu Bin , Cao Liang

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co. , Ltd. of China Power
Engineering Consulting Group , Wuhan 430071 , Hubei , China)

Abstract: With the development of overseas power transformation projects by Chinese power design companies year after year , the differences in design standards for grounding grids have become increasingly prominent issues in the implementation of international power project construction. Based on the analysis of IEEE std 80 and GB/T 50065 , the similarities and differences between the two specifications in the selection of grounding conductors , the grounding criteria and the calculation method of shunt coefficients are presented. At the same time , the internal causes of the differences in the calculation results such as cross - section selection , grounding resistance , touch potential difference and step potential difference of the grounding conductor are analyzed in detail. Taking the design of grounding grid in a substation abroad for example , the above differences are compared in detail to provide a standard selection method for power engineers when designing a grounding grid for a foreign substation.

Key words: grounding conductor; grounding resistance; step potential difference; touch potential difference; current division factor

0 引 言

在国家“十三五”规划转变经济发展模式的政策背景以及“一带一路”的推动下,国内工程公司都在积极拓展国外市场。尤其是近年来国家电网公司构建全球能源互联网已经从战略构想阶段进入落地实施阶段,必将进一步扩大国内电力设计院海外电力设计市场。变电站接地网是保证变电站电气设备

安全可靠运行、工作人员人身安全的重要设施。然而国外接地网设计采用标准与国内标准存在差异,弄清楚国内外接地标准差异的内部原因将极大地提高设计院工作效率,拓宽工作思路,进而提高本行业在电力建设技术领域的国际竞争力。

文献[1]在接地导体截面的选择、接地电阻值计算、接触电势与跨步电压计算等3个方面进行了差异比较,但没有指明国内外标准在接地设计判据上的侧重点,没有从更深层次的原理上分析两标准存在差异的原因。文献[2]依据牵引变电站接地网

设计,详细分析了国内外接地标准在接地电阻值计算、接触电势跨步电压限值两方面的差异,但其忽略了接地导体在接地标准中的差异,显然接地导体的选择是接地网设计的基础,该项选择将影响变电站建设的工程量甚至后期变电站的安全可靠运行。

下面从接地导体截面的选择、接地判据的侧重点、电流分流系数等方面进行了深层次的分析,给出了IEEE Std 80^[3]和GB/T 50065^[4]两标准存在的差异以及存在这些差异的内部原因,为设计工程师在比较国内外接地标准差异时提供了便利。

1 接地装置导体的选择方法比较

每一接地系统的元件,包括地网导体、连接、连接导线和所有的主电极,IEEE Std 80和GB/T 50065都规定了其设计应该符合装置的预期寿命要求,即在选择接地装置导体的材质和截面时,应满足热稳定校验要求,同时需考虑设计使用年限内土壤对其的腐蚀影响。

可以发现两本规范在导体选择的基本原则上是-致的,但是在热稳定校验的方式上存在差异。两本规范的热稳定校验都是在式(1)上化简而来的。

$$I_g = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (1)$$

式中: A_{mm^2} 为导体截面积; T_m 为导体最大许可温度; T_a 为环境温度; T_r 为材料常数的参考温度; α_r 为参考温度 T_r 时电阻率的温度系数; ρ_r 为参考温度 T_r 时接地导体的电阻率; K_0 为 $1/\alpha_0$ 或 $(1/\alpha_r) - T_r$; t_c 为电流的持续时间; TCAP为每单位体积的热容量。

1.1 IEEE Std 80 热稳定校验方法

IEEE Std 80中规定,接地导体(线)的最小截面可按式(2)的简化公式计算:

$$A_{mm^2} \geq I_g \times K_f \sqrt{t_c} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)可知:

$$K_f = 1 / \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{\alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (3)$$

1.2 GB/T 50065 热稳定校验方法

GB/T 50065中规定,接地导体(线)的最小截面应符合式(4)的要求:

$$A_{mm^2} \geq \frac{I_g}{C} \sqrt{t_c} \quad (4)$$

根据式(1)、式(4)可知:

$$\frac{1}{C} = 1 / \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{\alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (5)$$

1.3 两种热稳定校验方法的异同

考虑到 t_c 是短路电流的持续时间,其主要与电力系统的二次保护时间有关,不是接地规范考虑的重点,因此比较两本规范的热稳定校验公式可以发现,其主要区别是短路入地电流 I_g 和接地材料的热稳定系数 $K_f(1/C)$,这里主要讨论接地材料的热稳定系数差异,短路入地电流 I_g 的计算差异将在第3节中讨论。

通过1.1节和1.2节对接地材料热稳定系数 $K_f(1/C)$ 的比较,可以发现两者在公式计算上并无差异,然而归纳总结两本规范中已给出的相关接地材料热稳定系数,如表1所示(为方便比较,表中已进行了单位换算,与标准中的系数不一致),可以发现IEEE Std 80中的接地材料热稳定系数比GB/T 50065中的要小,这是由于两标准在最大许可温度 T_m 上的选取有差异。

表1 接地材料热稳定系数比较

| 材料 | IEEE Std 80 | | GB/T 50065 | |
|-----|----------------------|-------|----------------------|-------|
| | $T_m/^\circ\text{C}$ | K_f | $T_m/^\circ\text{C}$ | $1/C$ |
| 退火铜 | 1083 | 7 | 700 | 7.93 |
| 铜镀钢 | 1084 | 14.64 | 700 | 16.59 |

GB/T 50065中考虑了接地导体连接处放热焊的最大允许温度,例如铜和铜覆钢可根据土壤腐蚀的程度分别取900℃、800℃和700℃;钢和铝材的最大允许温度可分别取400℃和300℃。而在IEEE Std 80中 K_f 的计算值是按照材料本身所能允许的最大温度来考虑的,因此计算所得的接地材料热稳定系数IEEE Std 80的标准会比GB/T 50065的要小,自然计算所得的导体最小截面积IEEE Std 80的标准会比GB/T 50065的要小。但这并不意味着IEEE Std 80标准不保守甚至不准确,需要注意的是,IEEE Std 80中还规定了在地网中,地上和地下的所有连接都应被评估,以便达到所用导体的全面要求,即电导率、耐腐蚀性、通流量和机械强度。这些连接点应足够大以便保持其温升低于导体的温升,并能抵御热效应的影响。显然,IEEE Std 80是定性地说明了需要考虑接地材料连接点的电导率、耐腐蚀性、通流量和机械强度;而GB/T 50065则是根据经验公式定量地给出了接地材料连接点的电导率、耐腐蚀性、通流量和机械强度。

2 接地设计判据的侧重点比较

2.1 国内外接地标准判据侧重点

中国变电站的接地设计必须符合GB/T 50065

-2011《交流电气装置的接地设计规范》中有关接地的要求。其规定,接地电阻、接触电位差和跨步电位差在四季中均应符合相关要求^[4]。

而国外接地设计则多要求符合 IEEE Std 80 - 2013 的规定。其规定侧重点在于接触电位差和跨步电位差在四季中均应符合相关要求。

中国对接地设计,要求通过计算获得的接地电阻值和地电位升高要在给定的限值以内,要求的地电位升限值为 2 kV 或者 5 kV,相应的接地网的接地电阻宜符合式(6)要求:

$$R \leq 2000/I_c \quad (6)$$

由于中国电网的发展,系统短路容量迅速扩大,式(6)已很难满足要求,在采取相关措施后,地电位升限值可提高为 5 kV。

IEEE Std 80 标准中虽然给出了接地电阻的计算方法,同时还规定了大型的系统变电站接地电阻可限制在 1 Ω 左右,但并没有将接地电阻作为设计考核的依据,其考核判据是变电站所计算的最大接触电势和最大跨步电压不超越其所规定的限值,该限值的计算是通过人体所能耐受的程度来计算的。

2.2 接地电阻的计算方法

GB/T 50065 中给出了均匀土壤中水平接地极为主动边缘闭合的复合接地网的接地电阻计算公式为

$$R_n = \alpha_1 R_e \quad (7)$$

式中: R_n 为任意形状边缘闭合接地网的接地电阻; R_e 为等值(等面积、等水平接地极总长度)方形接地网电阻; α_1 为水平接地网的形状系数(关于水平地网的面积 S 和接地网外缘边线总长度 L_0 的方程)。 R_e 的计算原理是将接地网等效为一个圆盘接地极,进而计算圆盘的接地电阻,然后通过内插法将圆盘接地电阻值等效转化为方形接地网的接地电阻。

IEEE Std 80 中是采用先独立计算出水平接地网和垂直接地极的自电阻系数 R_1 和 R_2 , 然后计算水平接地体和垂直接地体的互电阻系数 R_{12} , 最后通过式(8)计算系统总电阻 R_g 。

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (8)$$

仔细研究两标准公式的计算原理,可以发现,GB/T 50065 中计算方法的简化原理有所不同,GB/T 50065 认为发电站、变电站的占地面积一般都比较小,垂直接地体对降低接地电阻所起的作用很小(不过 2% ~ 8%)。这是因为变电站的水平接地体可以等效为一个直径为 b 的圆盘,对于垂直接地体

来说,即使密密麻麻地打了很多垂直接地体,也可以将其等效为一个厚度为 a (垂直接地体长度)的圆盘,然而对于实际变电站来说, $a \ll b$, 它仍然可以近似地按一个直径为 b 的薄圆盘计算。

因此 GB/T 50065 在计算复合地网的接地电阻时,忽略了垂直接地体对接地电阻的影响。显然,IEEE Std 80 中并没有忽略垂直接地体的影响,其计算也更为复杂。

2.3 接触电势和跨步电压的限值计算方法

IEEE Std 80 将人体分为 50 kg 和 70 kg 两种类型考虑,规定了跨步电压和接触电势的最大限值。

对于 50 kg 的人:

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

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

对于 70 kg 的人:

$$E_{step} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

式中: E_{step} 为跨步电压; E_{touch} 为接触电势; C_s 为表层衰减系数; ρ_s 为地表的电阻率。

GB/T 50065 中规定 110 kV 以上有效接地系统的接触电势和跨步电压不应超过式(13)、式(14)计算所得的数值:

$$E_{step} = (1500 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

$$E_{touch} = (1500 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (14)$$

针对式(9)至式(14),绘制以 ρ_s 为自变量、跨步电压和基础电势为因变量的数据图,如图 1 至图 4 所示。

通过比较两规范要求,可以发现,其在规定接地系统的接触电势和跨步电压的原理上是保持一致的,都是从人体能够耐受的电流出发,建立人体触电电路模型,进而求解跨步电压和接触电势限值。但是比较两本规范最后所得的计算公式可知,区别主要体现在:

1) IEEE Std 80 将人体耐受电流分为两种类型分别求解,而 GB/T 50065 中将人体都按 50 kg 来考虑,这是因为 50 kg 人体更符合中国人的体型,而且其对应的接触电势和跨步电压限值更小,能够针对不同体重的人群,其计算结果更为严格。

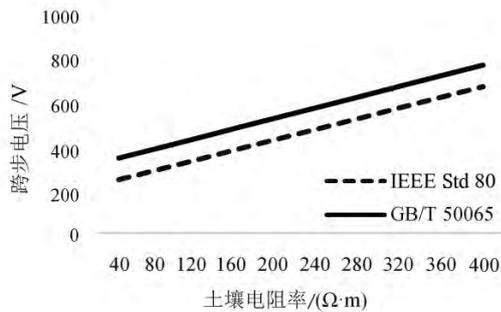


图1 IEEE Std 80(50 kg 人体)与GB/T 50065 跨步电压比较

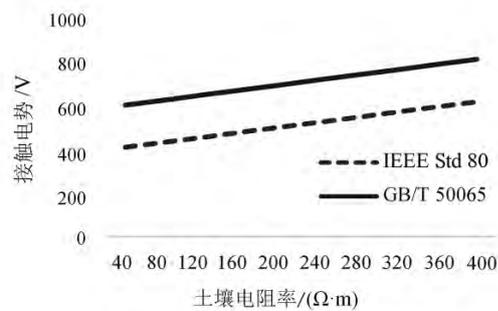


图2 IEEE Std 80(50 kg 人体)与GB/T 50065 接触电势比较

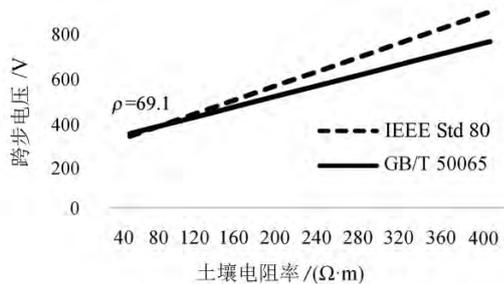


图3 IEEE Std 80(70 kg 人体)与GB/T 50065 跨步电压比较

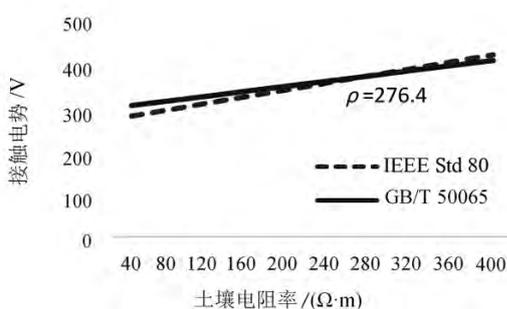


图4 IEEE Std 80(70 kg 人体)与GB/T 50065 接触电势比较

2) IEEE Std 80 将人体电阻按 1000Ω 考虑,而 GB/T 50065 中将人体电阻按 1500Ω 考虑,自然 IEEE Std 80 在接触电势和跨步电压的限值选择上更为严格。

3) IEEE Std 80 按人体 50 kg 耐受电流考虑时,其计算所得的跨步电压限值和接触电势限值均比

GB/T 50065 规范的计算值要小,这是由于 IEEE Std 80 选取的人体电阻值更小。

4) IEEE Std 80 按人体 70 kg 耐受电流考虑时,其计算所得的跨步电压限值和接触电势限值与 GB/T 50065 的计算值大小和土壤电阻率有关。当土壤电阻率 $\rho_s \leq 69.1 \Omega \cdot \text{m}$ 时,基于 IEEE Std 80 计算的跨步电压限值更为保守;反之基于 GB/T 50065 计算的跨步电压限值更为保守。当土壤电阻率 $\rho_s \leq 276.4 \Omega \cdot \text{m}$ 时,基于 IEEE Std 80 计算的接触电势限值更为保守;反之基于 GB/T 50065 计算的接触限值更为保守。

3 短路电流分流系数计算方法比较

如果输电线路的架空地线或中性导线连接到变电站的接地体上,那么当系统发送故障时,一部分短路电流可以由与地网连接的架空地线构成回路流通,因此经地网入地的电流并不等于接地点的全部短路电流。

IEEE Std 80 中并没有明确规定短路电流分流系数的计算方法,其认为分流系数的影响主要来自于架空地线和中性导线以及直埋管道和电缆的影响。其简要地介绍了多种对于防雷线、相导线等建模技术,并认为确定分流系数方法的选择将取决于系统连接到变电站的复杂性以及理想的准确度,因此 IEEE Std 80 对于分流系数计算方法的选择没有准确规定,须由设计工程师根据实际工程需要,在众多方法中选择合适的计算方法。

GB/T 50065 中给出了具体的计算公式,其将线路按架空线路接地的档距分段,采用具有集中参数的 π 型电路,然后采用传输线理论,以各节点电压为变量建立节点电压方程求解。

4 算例分析

以某海外项目中设计的换流站为例,该换流站实测土壤电阻率为 $10.3 \Omega \cdot \text{m}$,换流站表层不采取降阻措施。流经接地装置的最大入地短路电流取 63 kA ,故障隔离时间取 0.35 s 。依据标准中的热稳定校验要求,计算换流站接地导体的最小截面。

按照 GB/T 50065,未考虑腐蚀时,接地线的最小截面为

$$S_g \geq \frac{I_g}{C} \sqrt{t_c} = \frac{63\,000}{249} \sqrt{0.35} \text{ mm}^2 = 149.68 \text{ mm}^2$$

按照 IEEE Std 80 - 2013 中 11.3.1.3 节公式进行计算,接地线的最小截面为

$$A_{\text{kcmil}} \geq I \times K_f \times \sqrt{t_c} = 63 \times 7 \times \sqrt{0.35} \text{ kcmil} \\ = 260.9 \text{ kcmil} = 153.03 \text{ mm}^2$$

地网面积为 137 000 m²,埋设深度为 0.8 m,水平接地体为 150 mm²的铜绞线,垂直接地体为 φ17.2 mm、长 3 m 的镀铜钢棒,经统计,接地导体的总长度为 49.14 km,接地网外边缘长度为 2.52 km。按照 GB/T 50065 标准和 IEEE Std 80 标准分别计算该换流站的接地电阻、跨步电压限值、接触电势限值等,计算结果如表 2。

表 2 接地计算结果表

| 标准 | 接地电阻 限值/Ω | 接地电阻 计算值/Ω | 跨步电压 限值/V | 接触电势 限值/V |
|------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| IEEE | ≤1 | 0.010 | 208.19 | 199.11 |
| GB/T | 0.03 | 0.012 | 306.23 | 297.14 |

由表 2 可见,采用两种标准计算得出的接地电阻相差不大,这侧面说明了垂直接地体对大型变电站接地电阻的影响不大。

采用 CDEGS 计算软件算得该换流站接触电势和跨步电压结果如图 5、图 6 所示。

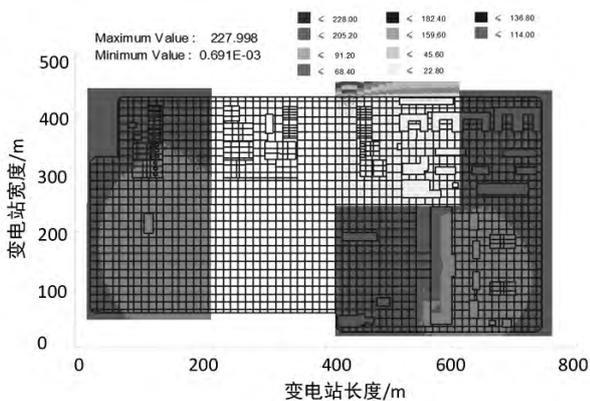


图 5 变电站接触电势分布

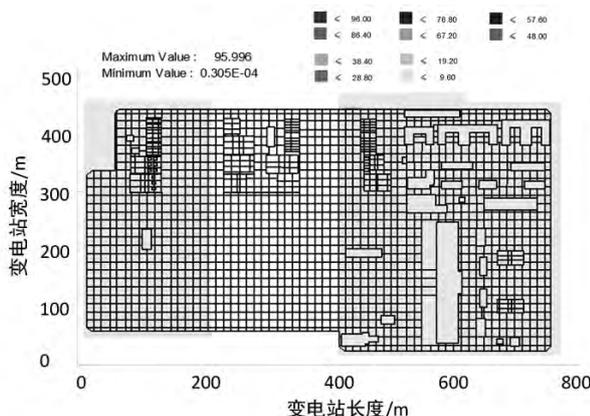


图 6 变电站跨步电压分布

结果表明,全站跨步电压最大值为 96 V,接触

电势最大值为 228 V,显然计算所得的跨步电压均满足 IEEE Std 80 和 GB/T 50065 的要求,然而接触电势仅满足了 GB/T 50065 的要求,并未满足 IEEE Std 80 的要求。由此可以看出: IEEE Std 80 比 GB/T 50065 在接地电阻上的要求要宽松; IEEE Std 80 比 GB/T 50065 在接触电势和跨步电压的要求上要更严格。但是 IEEE Std 80 的判据侧重点在接触电势和跨步电压上,因此采用中国标准设计的接地网未必能够满足国际 IEEE 标准要求。

5 结 语

IEEE Std 80 和 GB/T 50065 在接地导体的选择原理上是一致的,但是在计算导体截面积的方法上存在化简原则的差异,其差异主要体现在导体最大允许温升的选择上。

IEEE Std 80 和 GB/T 50065 在接地判据的侧重点上有所不同,IEEE Std 80 的判据原则侧重接触电势和跨步电压不超过允许值,而 GB/T 50065 结合接地电阻、接触电势和跨步电压来综合判断。

GB/T 50065 在计算复合地网的接地电阻时,忽略了垂直接地体对接地电阻的影响,而 IEEE Std 80 中并没有忽略垂直接地体的影响,其计算也更为复杂。

IEEE Std 80 在计算接触电势和跨步电压限值时将人体分为两种类型来考虑,同时在人体等效电阻的选择上,IEEE Std 80 比 GB/T 50065 更小。

参考文献

- [1] 胡庆来,李汉峰. IEEE 接地设计标准与我国接地设计标准的异同分析[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 100 - 104.
- [2] 徐剑,楚振宇. 中外牵引变电所接地设计标准对比分析[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(4): 70 - 73.
- [3] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding: ANSI /IEEE Std 80 - 2013[S], 2013.
- [4] 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065 - 2011[S], 2011.
- [5] 谢广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996.

作者简介:

张 顺(1992), 硕士, 助理工程师, 主要从事换流站变电站设计工作。

(收稿日期: 2019 - 12 - 04)