

# 牵引变电所接触电位影响因素分析

侯东光

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300000)

**摘要:** 根据牵引变电所内接触电位核验的需求, 对变电所内敷设碎石和混凝土两种场坪接触电位允许值进行计算, 分析了影响接触电位计算值的主要因素, 结合工程实际情况讨论了接触电位不满足允许值时变电所采取工程措施的实施效果。研究表明, 当计算接触电位不满足允许值要求时, 牵引变电所采用换填电阻率较低的土壤工程实施效果较好。

**关键词:** 牵引变电所; 接触电位; 电阻率; 变电所场坪

**Abstract:** According to the demand of checking contact potential in traction substation, the allowable contact potential values of gravel field flat and concrete field flat in the substation are calculated. The main factors affecting the calculated value of contact potential are analyzed, combined with the actual engineering situation, the effect of taking engineering measures when the contact potential does not meet the allowable value is discussed. The results show that the soil with lower filling resistivity is more effective for traction substations.

**Key words:** traction substations; contact potential; the resistivity; substation field flat

## 0 引言

随着我国电气化铁路运行里程的不断增长, 牵引变电所的数量也日益增多, 变电所接地系统不仅关系到所内设备的正常、可靠运行, 同时对运行人员人身安全也起着至关重要的作用。目前我国西北地区的铁路建设规模的快速发展, 越来越多的牵引变电所建设在高土壤电阻率的地区, 同时变电所设备布置趋向紧凑化, 所亭平面布局应尽量减少征地面积, 主接地网的面积进一步缩减, 且高速铁路中牵引变电所外电源进线的系统短路容量随着电力系统规模的增大而提高, 故障时入地短路电流随之增加。伴随以上诸多因素, 牵引变电所接地系统的设计中存在接触电势不满足规范要求的情况。本文将对牵引变电所接触电位影响因素进行特性分析。

### 1 牵引所场坪绝缘性能的研究方法

#### 1.1 接触电势允许值计算

接触电位差是指接地(故障)电流流过接地装置时, 大地表面形成分布电位, 在地面上离设备水平距离为0.8m处与设备、构架或墙壁离地面垂直距离1.8m处2点间的电位差。由于地网网孔的存在形成的网孔内各点对接地网的电位差, 将网孔中心对地网接地极的最大电位差称为最大接触电位差。为了防止接地故障发生时运行人员操作外壳接地的带电设备所造成的触电危险, 接地设计时应将接触电势限制在规范要求的安全值范围内。在110kV及以上有效接地系统发生单相接地或同点2相接地时, 接触电位差的允许值和地网实际最大接触电位差的计算公式如下:

$$U_{t1} = \frac{174 + 0.17 \cdot \rho_s}{\sqrt{t_g}} \quad (1)$$

式中:  $U_{t1}$ 为接触电位差(允许值);  $\rho_s$ 为土壤电阻率;  $t_g$ 为接地短路(故障)电流的持续时间。

表 1 碎石及混凝土电阻率

| 类别  | 名称      | 电阻率近似值 (·m) |
|-----|---------|-------------|
| 岩石  | 碎石      | 5000        |
|     | 在水中     | 40~55       |
| 混凝土 | 在湿土中    | 100~200     |
|     | 在干土中    | 500~1300    |
|     | 在干燥的大气中 | 12000~18000 |

根据表1中的数据可知碎石的电阻率为5000Ω·m, 混凝土需要考虑场坪长时间被雨水浸泡的情况, 电阻率选取为50Ω·m。按照上一级保护动作跳闸时间选取, 时间为1s。

#### 1.2 接触电势计算值

计算接地网接触电势时, 认为接地网土壤电阻率均匀分布且接地网水平接地极等间距布置。接触电势的计算采用接地网网孔中心地面上与接地网的电位差, 网孔电压表征接地网的一个网孔可能出现的最大接触电位差, 即最大接触电位差为最大网孔电压。

接地网初始设计时网孔电压计算公式如下:

$$U_m = \frac{\rho_{Lo} K_m K_t}{L_m} \quad (2)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{L_m(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{t1}}{K_t} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (3)$$

$$K_t = \sqrt{1 + h/h_0} \quad (4)$$

式中  $\rho_{Lo}$ —土壤电阻率, Ω·m;

$K_m$ —网孔电压几何校正系数;

$K_t$ —接地网不规则校正系数, 用来计及推导 $K_m$ 时的假设条件引入的误差;

$I_g$ —计及直流偏移的经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值, A;

$D$ —接地网平行导体间距, m;

$d$ —接地网导体直径或等效直径, m;

$h$ —接地网埋深, m;

$K_{ii}$ —接地网埋深系数；

$h_0$ —参考埋深，取1m；

$K_{ii}$ —因内部导体对角网孔电压影响的校正加权系数。

对于无垂直接地体只有少数垂直接地极，且垂直接地极不是沿外周或四角布置时， $K_{ii}$ 可按照下式计算。

$$K_{ii} = 1 / (2n)^{2/n} \quad (5)$$

$$n = \sqrt{n_1 n_2} \quad (6)$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  为 x 和 y 方向上的导体数量。

接地网不规则校正系数  $K_{ii}$  可按照式 (7) 计算：

$$K_{ii} = 0.644 + 0.148n \quad (7)$$

对于在边角有垂直接地极的接地网，或者沿接地网四周和其内部布置垂直接地极时，有效埋设长度可按照式 (8) 计算：

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (8)$$

式中  $L_r$ —每个垂直接地极的长度，m。

$L_x$ —接地网x方向的最大长度，m；

$L_y$ —接地网y方向的最大长度，m；

$L_c$ —接地网水平接地体总长度，m；

## 2 牵引所场坪绝缘特性分析

### 2.1 参数选取

本文以某项目的牵引变电所为例，进行牵引所接触电势的计算。该牵引变电所外电源电压等级为 220kV，短路故障电流 15kA，入地分流系数取 0.5，高压设备采用户外中型布置方式，围墙占地面积为  $90 \times 80\text{m}^2$ ，具体计算参数如下：

表 2 牵引变电所计算参数

| 参数名称  | 取值       |
|-------|----------|
| D     | 5 (m)    |
| d     | 0.014(m) |
| h     | 1.5(m)   |
| $n_1$ | 20       |
| $n_2$ | 17       |
| $L_r$ | 3.5(m)   |
| $L_x$ | 100(m)   |
| $L_y$ | 85(m)    |
| $L_c$ | 3382(m)  |
|       | 85 (m)   |

## 2.2 计算结果

### 2.2.1 接触电位计算

利用公式 (1)，带入参数后计算得出两种变电所场坪材料下接触电位允许值：

表 3 接触电位允许值

| 场坪形式      | 接触电位允许值 (V) |
|-----------|-------------|
| 碎石        | 1024        |
| 混凝土 (在水中) | 182.5       |

利用公式 (2)~(8)，带入参数后计算得变电所场坪接触电位计算值为 347.2V，结合表 3 可知此种情况下牵引变电所设备区场坪采用碎石时，计算的接触电位满足最大值的的要求，而当设备区采用混凝土硬化时，在场坪长时间被雨水浸泡后接触电位计算值高于允许值。

### 2.2.2 接触电位计算值影响因素研究

根据变电所接触电势的计算值公式可知，接触电位计算值的主要影响因素为土壤电阻率、接地网面积、导体水平间距、垂直接地体长度。本文将对上述影响因素对接触电位计算值影响特性进行分析。

#### 1. 导体水平间距

保持接地网面积和土壤电阻率等参数不变的情况下，将水平接地体之间的间距由 3m 增大到 12m，分析接触电位变化趋势，结果如图所示。

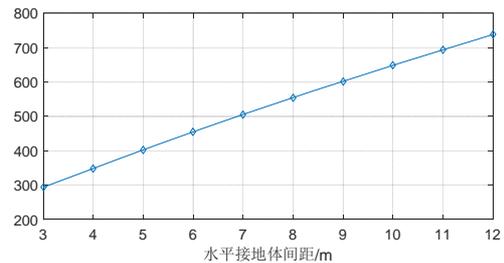


图 1 接触电位随水平接地体间距变化趋势

根据图 1 中计算结果可得，水平接地体间距越大，接触电位计算值越大，且基本呈线性关系。水平接地体间距从 12m 减少到 3m 时，接触电位从 738.09V 降低到 294.04V。

#### 2. 接地网面积

保持接地网水平接地体间距及土壤电阻率等参数不变，将接地网面积从  $8500\text{mm}^2$  增加到  $16200\text{mm}^2$ ，分析接触电位变化趋势，结果如图所示。

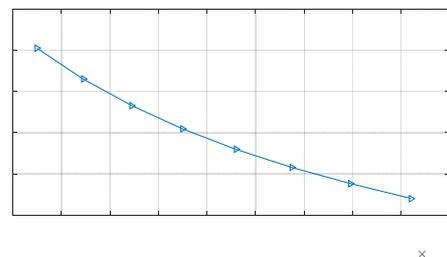


图 2 接触电位随接地网面积变化趋势

根据图 2 中计算结果可得，接地网面积增加将会降低接触电位，接地网面积增加约一倍，接触电位从 402.36V 降低到 220.31V，且随着面积的增加，对接触电位降低的效果有所减弱。

### 3. 土壤电阻率

保持接地网面积和水平导体间距等参数不变,研究土壤电阻率变化对变电所接触电位的影响特性,计算结果如下。

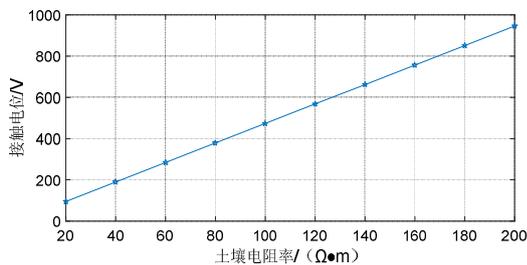


图 3 接触电位随土壤电阻率变化趋势

根据图 3 中计算结果可知,土壤电阻率与接触电位之间的基本呈线性关系,随着土壤电阻率的增加,接触电位也随之增大,电阻率从  $20 \Omega \cdot m$  增加到  $200 \Omega \cdot m$ ,接触电位从 94.67V 提高到 946.72V,由此可见土壤电阻率对接触电位计算值具有较大的影响。

### 4. 垂直接地体数量及长度

保持接地网面积和水平导体间距等参数不变,分析接地网内垂直接地体数量及长度及接触电位计算值的影响,计算结果如下。

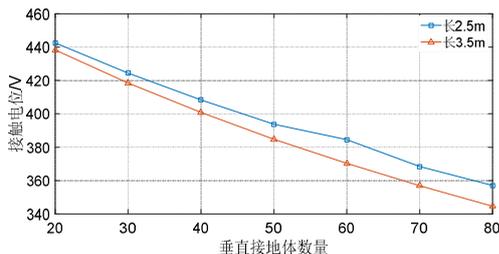


图 4 接触电位随垂直接地体数量及长度变化趋势

由图 4 中计算结果可得,增加垂直接地体的长度可以在一定程度上降低接触电位计算值,且在垂直接地体数量增多时,增加垂直接地体长度对降低接触电位计算值的效果更加明显。同时,垂直接地体数量基本与接触电位计算值成线性关系,计算过程中长 2.5m 垂直接地体数量从 20 根增加到 80 根时,接触电位从 442.47V 降低到 357.08V。

### 2.2.3 工程解决措施

根据土壤电阻率、接地网面积、导体水平间距、垂直接地体长度及数量等影响因素对接触电位计算值影响特性分析结果可知,降低土壤电阻率,增加接地网面积、减小水平接地体间距,增加垂直接地体的数量及长度均可以在一定程度上实现降低接触电位的效果,下面将对四中措施在工程中的实施特点进行分析。由于场坪采用碎石敷设时通常接触电位计算可以满足允许值,但采用混凝土地面时,基本很难满足接触电位的允许值,因此,仅讨论变电所场坪采用混凝土敷设时的工程解决措施。

#### 1. 减少导体水平间距

根据《铁路电力牵引供电设计规范》TB-10009-2016

中的要求,牵引变电所内接地网水平接地体导线间距根据实际情况确定,但不宜小于 5m。目前的牵引变电所内水平接地体之间的间距根据场坪内设备布局的情况确定,基本处于 5-8m 之间。若场坪内敷设混凝土地面时,通过降低导体之间的间距也很难达到接触电位的允许值,同时水平接地体投资也会有较大增加。

#### 2. 增加接地网面积

目前牵引变电所接地网的敷设面积与围墙面积基本相等或稍大,均敷设在征地界内。若增加接地网面积将会对应增加征地范围,根据计算结果可知,接地网面积增加将近一倍时接触电位降低约 45%,但仍不满足接触电位的允许值。因此,若采用此种方法降低接触电位,由征地范围和接地体长度增加引起的工程投资较大,在部分征地困难的地区实施难度较大。

#### 3. 降低土壤电阻率

通过降低土壤电阻率的方式减少接触电位计算值的方式的效果相对较为明显,根据计算结果显示,将土壤电阻率降低为  $38 \Omega \cdot m$  时,接触电位计算值即可满足。实际工程中可通过将变电所场坪下方土壤换填为满足接触电位允许值时对应的土壤电阻率土壤,工程可实施性相对较高。

#### 4. 增加垂直接地极数量和长度

根据计算结果显示,通过增加垂直接地体的数量和长度可以降低接触电位计算值,但降低效果一般。垂直接地极均采用纯铜棒材质,数量有 20 根增加到 80 根时,工程投资增加较大,且接触电位仅降低了 19.3%,仍未满足接触电位允许值的要求。因此,通过增加垂直接地极数量和长度的方式降低接触电位计算值的工程实施性较差。

### 3 结论

结合计算结果,若牵引变电所内场坪采用碎石敷设时,接触电位的计算值基本都可以满足允许值的要求。若变电所场坪采用混凝土敷设时,接触电位存在不满足要求的情况,需要采取相应解决措施。通过对接触电位计算值主要影响因素的特性分析,采用降低变电所下方的土壤电阻率的方式工程可实施性和降低效果相对较好,土壤换填后接触电位计算值可以满足允许值要求。

### 参考文献

[1] 窦娟, 吴小东. 变电站操作绝缘地坪材料的绝缘性能[J]. 电力建设, 2011, 32(07): 97-100.  
 [2] 中国电力企业联合会. GB50065-2011 交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
 [3] 罗晓雪, 周文乐, 丘宏烈. 变电站接地网地面电位分布计算[J]. 现代电力, 2010, 27(05): 30-33.

### 作者简介:

侯东光 (1993), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事电气化铁路变电电气一次设计工作。