

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.012

变电站三维立体接地网的研究与应用

徐彬鑫¹, 李祥飞¹, 黎 德²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 益阳电力勘测设计院有限公司, 湖南 益阳 413000)

摘要: 针对湖南省某 220 kV 全户内变电站的建设受变电站征地面积、地形等方面的限制, 使用常规方式的接地网设计难以满足国家标准中运行安全性和建设经济性要求的问题, 提出了三维立体接地网技术。先计算土壤电阻率、入地电流, 然后选择接地体材料, 布置及计算水平地网和垂直地网相结合的复合接地网, 最后校验三维立体接地网的接触电压和跨步电压。数据分析结果显示: 三维立体接地网布置能满足要求, 对类似的接地系统设计有较大的参考价值。

关键词: 变电站; 接地网设计; 三维立体接地网

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0058-06

Research and Application of 3D Grounding Grid in Substation

Xu Binxin¹, Li Xiangfei¹, Li De²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Yiyang Electric Power and Survey Design Institute Co., Ltd., Yiyang Hunan 413000, China)

Abstract: In view of the land area, terrain and other restrictions for the construction of Hunan 220 kV indoors substation and problems of the conventional way of grounding grid design difficult to meet the requirement of operation safety and economic construction in the national standard, proposed the three-dimensional grounding grid technology. First calculates the soil resistivity and the current into the ground, then selects the ground material, and allocates and calculates compound grounding grid with the horizontal grid and vertical grid. Finally checks the touch voltage and step voltage of the three-dimensional ground grid. Data analysis results show that the three-dimensional grounding grid meets the request. It has great reference value for the design of similar grounding system.

Keywords: substation; ground grid design; 3D grounding grid

0 引言

随着电力系统容量的不断增加, 流经地网的入地短路电流也愈来愈大, 为确保系统短路电流快速散失, 保证人身和电气设备的安全运行, 生产运行等部门对降低变电站接地网的接地电阻提出了更高、

更严格的要求。如何根据变电站的不同情况因地制宜地选择合适的降阻方案, 对变电站建设的经济性、运行的安全性都尤为重要^[1-2]。

我国变电站目前常用的几种接地网有: 水平等距网、水平不等距网、水平双层接地网。常用的降

收稿日期: 2015-10-16

作者简介: 徐彬鑫 (1990-), 女, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统自动化及其应用,

E-mail: 1262649790@qq.com

通信作者: 黎 德 (1982-), 男, 湖南宁乡人, 益阳电力勘测设计院公司助理工程师, 主要研究方向为变电站电气一次设计,

E-mail: cnw1982@163.com

阻措施有: 敷设引外接地体、深埋式接地体、填充降阻剂、敷设水下接地网等^[3]。在用地紧张、寸土寸金的市区, 大量 GIS (gas insulated switchgear) 设备的应用, 变电站占地面积越来越小, 因此需要设计合适的变电站接地方案。

在湖南某 220 kV 变电站的接地网设计中, 为满足上述要求, 结合变电站站址的实际情况, 本文提出三维立体接地网技术。三维立体接地网是在水平接地网的基础上, 将多根经过计算入地深度、位置和根数的超深垂直接地极打入地下深处, 并与水平接地网连接起来, 在地下的深层形成立体散流接地网。其特点是通过超深垂直接地极来降低整个地网的接地电阻值。

1 变电站基本情况

1.1 土壤电阻率

土壤电阻率在一年之中是变化不定的。本设计时, 采用实测土壤电阻率乘以季节系数作为土壤电阻率的测量公式^[4]。根据实测并考虑适当的季节系数得出变电站的土壤电阻率分布情况如下: 1) 变电站东北区域土壤电阻率分布较均匀, 为 250 Ω·m 左右; 2) 站址西部及东南部表层回填土土壤电阻率为 200 Ω·m, 分布为 0~ -5 m, 中层黏土层土壤电阻率为 95 Ω·m, 分布为 -5~-11 m, 下层泥质粉砂岩土壤电阻率为 250 Ω·m, 分布为 -11 m 以下。

1.2 变电站内短路时入地电流计算

本系统阻抗按远景水平年考虑, 变电站系统阻抗如图 1~2 所示。

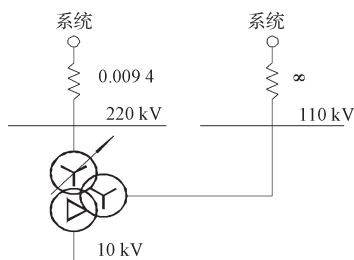


图 1 变电站系统正序阻抗图

Fig. 1 Positive sequence impedance diagram of substation

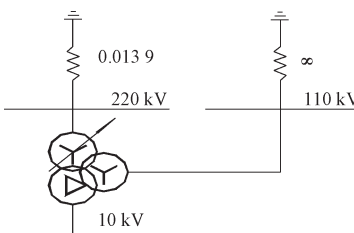


图 2 变电站系统零序阻抗图

Fig. 2 Zero sequence impedance diagram of substation

由图 1~2 可知, 变电站系统的正序阻抗图和零序阻抗图均包含 220 kV 侧系统阻抗、110 kV 侧系统阻抗、10 kV 侧系统阻抗和一个三绕组变压器。

已知主变阻抗的标么值为 $X_{*1}=0.0778$, $X_{*2}=0$, $X_{*3}=0.2111$ 。根据网络变换可得, 110 kV 母线电抗为 $X_{d,110}=0.03533$, 10 kV 母线电抗为 $X_{d,10}=0.2464$ 。当两相短路时, 电路中没有零序分量, 故此情况下主变接地的中性点各侧均无电流。同时, 系统 110 kV 侧正序阻抗和零序阻抗均为 ∞ , 主变阻抗 $X_{*2}=0$, 所以主变压器中压侧接地线上电流为零^[5]。根据短路计算结果以及变电站内发生短路时入地电流计算式 (1), 得到接地系统电流如表 1 所示。

$$I_{\lambda}=(I_d - I_n) \times (1 - K_{c1}), \quad (1)$$

式中: I_{λ} 为入地电流;

I_d 为故障点对地总电流;

I_n 为中性点接地线电流;

K_{c1} 取 0.5。

表 1 接地系统电流表

220 kV 母线 电流	三台主变运行, 一台 主变中性点接地		三台主变运行, 两台 主变中性点接地	
	单相接地	两相接地	单相接地	两相接地
故障点对地总 电流 I_d	23.49	10.53	23.92	25.54
中性点接地线 电流 I_n	0.36	0.48	0.70	0.95
入地电流 I_{λ}	11.56	12.45	11.60	12.30

由表 1 可知, 一台主变中性点接地的单相接地故障和两相接地故障的入地电流分别为 11.56 kA 和 12.45 kA, 而两台主变中性点接地的单相接地故障和两相接地故障的入地电流分别为 11.60 kA 和 12.30 kA。考虑接地电网的接地电阻一般情况要求值, 该变电站入地电流为 12.50 kA。

1.3 变电站接地方案研究

接地网的布置方式, 应根据接地点土壤的电阻率来选择。通常电阻率越高, 接地电流衰减越慢, 电位分布越不均匀^[6]。对于不同的土壤电阻率, 接地装置的布置方式见表 2。

表 2 土壤电阻率不同的地点接地网的布置方式

土壤电阻率 ρ_l / (Ω·m)	接地网布置方式
< 300	以垂直接地体为主的棒、带接地网
300 ~ 500	以水平接地体为主的棒、带接地网
> 500	伸长形的带状接地网

由于该变电站土壤电阻率不高 ($\rho \leq 250 \Omega \cdot m$),

先考虑水平地网布置,且单层地网比双层地网更具有经济性,土方量更小,后期运行维护更方便。降阻措施中,受变电站征地面积、地形等方面的限制,接地网向水平方向扩张的可能性很小,不能采用敷设引外接地体;若使用填充降阻剂则不利于环保;站址周围无地下水,不能采用水下接地网降阻方案。结合站址西部及东南部的 $-5 \sim -11 \text{ m}$ 深处有土壤电阻率($\rho=95 \Omega \cdot \text{m}$)较低的土层,因此采用超深垂直接地体降阻方案。考虑变电站接地网采用三维立体接地网,将接地网向纵深方向扩展,使入地短路电流通过垂直接地极流向大地深处。

2 变电站接地体的选择

2.1 水平接地体选择

目前主要采用的接地导体有2种:铜排及接地扁钢。根据DL/T621—1997《交流电气装置的接地》中的热稳定校验公式,接地导体(线)的最小截面应符合

$$S_g \geq \frac{I_g}{c} \sqrt{t_c}, \quad (2)$$

式中: S_g 为接地线的最小截面,单位 mm^2 ;

I_g 为流过接地导体(线)的短路电流稳定值,单位A;

t_c 为短路的等效持续时间,单位s;

c 为接地线的热稳定系数,根据材料的种类、性能及最大允许温度和短路前接地导体(线)的初始温度来确定。

根据计算,在不考虑腐蚀的情况下,变电站接地线截面不小于 294 mm^2 (扁钢)或 98 mm^2 (扁铜)。根据《交流电气装置的接地》,水平接地体截面取引下线的75%,即不小于 221 mm^2 (扁钢接地网)或 74 mm^2 (扁铜接地网)。根据国家电网基建[2012]386号文件《关于印发国家电网公司输变电工程提高设计使用寿命指导意见(试行)的通知》,户内变电站接地材料使用寿命应按60 a考虑。热镀锌扁钢年腐蚀速度取 0.065 mm (指总厚度,室外)或 0.045 mm (指总厚度,室内),扁铜年腐蚀速度取 0.01 mm (指总厚度)。通过式(2)计算,变电站接地导体的尺寸规格见表3。

表3 不同接地材料的尺寸规格表

Table 3 The sizes of different grounding materials mm

接地装置	材料尺寸(宽×厚)	
	铜	镀锌扁钢
水平接地体	30×4	60×8
室外接地引下线	40×4	80×8
室内接地引下线	30×4	60×8

从全寿命周期管理角度,对铜接地网、镀锌扁钢接地网进行技术性、经济性比较。由分析结果可知:铜接地网方案初期建设成本较高;虽然扁钢接地网有检查与更换等费用,但其在整个资产全寿命周期的成本低于铜接地网方案。而对于变电站接地网而言,采用铜接地网的最大优势是铜的腐蚀速率小,寿命长,运行维护费用小^[7]。

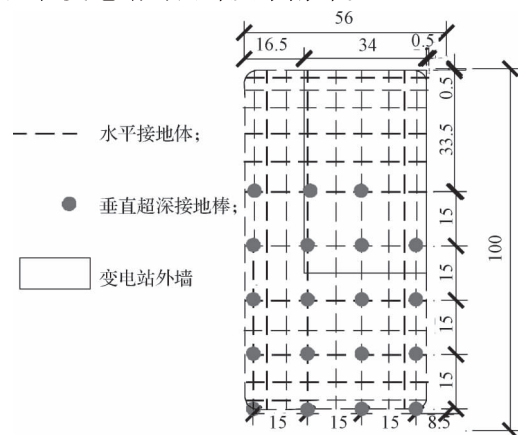
本变电站占地面积小,主地网较小,主地网所用水平接地导体仅2 000 m,而且主地网运行维护成本高。根据计算,全寿命周期内主地网采用铜排仅比采用热镀锌扁钢增加成本2万元。同时,该变电站为全户内布置变电站,接地网布置在综合配电楼下,因此,运行维护不方便。且变电站没有户外构支架,不需考虑接地铜排的电偶反应^[8]。因此本设计主接地网采用宽 $30 \text{ mm} \times$ 厚 4 mm 铜质接地网,室内接地网及设备引下线采用宽 $60 \text{ mm} \times$ 厚 8 mm 镀锌扁钢。

2.2 超深垂直接地极选择

变电站接地用超深垂直接地极,主要有4种:镀铜钢棒、铜包钢棒、镀锌钢棒和铜棒^[9]。由于镀铜钢棒的价格适中,特性稳定,施工方便,耐腐蚀性强,韧性好,棒芯具有高达 600 N/mm^2 抗拉强度,在地下使用寿命可达60 a,可与变电站设计的使用寿命相同步。因此在本设计中,垂直超深接地棒采用镀铜钢棒。

3 接地网的布置方案

变电站的三维立体接地网布置如图3所示。该变电站的接地网长为 100 m ,宽为 56 m 。水平接地网采用不等间距布置方式,覆盖整个接地网;垂直接地极布置在变电站的西部及东南部。



注:图中单位为m。

图3 变电站三维立体接地网布置图

Fig. 3 The 3D grounding grid layout

3.1 水平接地网布置方案

接地网优化设计的原理是, 在已有的接地网范围内, 通过调整水平接地网的接地导体布置, 以确保电气设备和人身的安全, 即通过优化设计使接地网地表电位分布均匀, 接地网的接地电阻、最大跨步电压和接触电势最小^[10-11]。

不等间距布置优化地网设计的原理是, 考虑到接地网对中间部分导体的屏蔽性, 接地导体的布置原则为中间稀、四周密, 使所有的接地导体得到充分利用。

通过计算可知: 等间距布置的接地网中每段导体的泄露电流密度数值相差很大, 边缘导体的泄露电流密度大约是中间导体的4倍左右; 而不等间距布置的接地网中, 增大了中间导体的泄露电流密度, 相应降低了边缘导体的泄露电流密度分布, 使得每段导体的泄露电流密度分布比较均匀, 边缘导体的泄露电流与中间导体数值相差不大, 这样有效改善电位分布, 降低接触电势和跨步电压。因此, 本水平接地网采用复式不等间距接地网。

不等间距接地网的长或宽方向的第*i*段导体长度 L_{ik} 占边长 L 的百分数 S_{ik} , 可按式(3)计算^[12]得到。

$$S_{ik} = \frac{L_{ik}}{L} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 L 为接地网的边长, 在长方向 L 表示为 L_1 , 在宽方向 L 表示为 L_2 。

接地电阻为

$$R = k_{RH} k_{RL} k_{RM} k_{RN} k_{RD} (1.068 \times 10^{-4} + 0.445/\sqrt{S}) \rho, \quad (4)$$

式中: k_{RH} 为接地电阻的埋深;

k_{RL} 为接地电阻的形状;

k_{RM} 为网孔数目;

k_{RN} 为导体根数;

k_{RD} 为导体直径对接地电阻的影响系数;

S 为接地网总面积。

最大接触电位差 U_T 为

$$U_T = k_{TL} k_{TH} k_{TD} k_{TS} k_{TN} k_{TM} V, \quad (5)$$

式中: k_{TL} 为最大接触电位差的形状;

k_{TH} 为埋深;

k_{TD} 为接地导体直径;

k_{TS} 为接地网面积;

k_{TN} 为接地体导体根数;

k_{TM} 为接地网网孔数目影响系数。

V 为接地网的最大接地电位升高, $V = I_{GM} R$, 其中, I_{GM} 为流入接地网的最大接地故障电流。

最大跨步电位差 U_S 为

$$U_S = k_{SL} k_{SH} k_{SD} k_{SS} k_{SN} k_{SM} V, \quad (6)$$

式中: k_{SL} 为最大跨步电位差的形状;

k_{SH} 为埋深;

k_{SD} 为接地导体直径;

k_{SS} 为接地网面积;

k_{SN} 为接地导体根数;

k_{SM} 为接地网网孔数目影响系数。

接地网的接触电位差允许值 U_t 和跨步电位差允许值 U_s 分别为

$$U_t = \frac{174 + 0.17 \rho_s C_s}{\sqrt{t_s}}, \quad (7)$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7 \rho_s C_s}{\sqrt{t_s}}, \quad (8)$$

式中: ρ_s 为地表的电阻率;

C_s 为表层衰减系数;

t_s 为接地故障电流持续时间, 与接地故障等效持续时间 t_e 等值。

变电站占地面积1 938 m², 敷设接地网面积为4 650 m², 主地网埋深0.8 m。根据计算, 当本变电站为不采取任何降阻措施的原始接地网式, 接地网的接地电阻为1.20 Ω, 入地短路电流经计算为12.5 kA。本站最大接触电势约为982.3 V, 最大跨步电压约为642 V。接触电势超过限值(258.0 V), 跨步电压超过限值(389.5 V), 该方案不满足安全运行要求^[13-14]。因此该变电站接地网的设计除了采用水平接地网布置外, 还需要采用其他的降阻方案来达到安全运行的要求。

3.2 垂直接地极布置方案

当下层土壤电阻率低于上层土壤电阻率时, 采用埋设垂直接地体的方法降阻效果较好。因此垂直接地体宜布置在下层电阻率较低的站址西部及东南部。由于土壤电阻率较低的土层主要为-5~-11 m深处的粘土层, 因此单根接地体的长度采用10 m。

为了减小水平接地网对垂直接地极和垂直接地极之间的屏蔽作用, 提高垂直接地极的利用率, 垂直接地极应尽可能均匀分布, 并拉开距离, 垂直接地极之间的距离不宜小于其长度。

全站共设置19根垂直超深镀锌铜钢接地棒, 均布置在下层土壤电阻率较低的西侧和南侧, 接地棒之间的距离为15 m。

3.3 接地网计算

3.3.1 接地电阻计算

1) 垂直接地体的接地电阻计算

根据DL/T5091—1999《水力发电厂接地设计技术导则》, 穿过不同电阻率的2层土壤中垂直接地体的等效土壤电阻率为

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{H}{L}(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}, \quad (9)$$

式中: ρ_1 为上层土壤电阻率, $200 \Omega \cdot \text{m}$;

ρ_2 为下层土壤电阻率, $95 \Omega \cdot \text{m}$;

H 为垂直接地体在上层土壤中的长度, 5 m ;

L 为垂直接地体在土壤中的总长度, 10 m 。

通过式(9)可得, 土壤电阻率为 $129 \Omega \cdot \text{m}$ 。

根据《交流电气装置的接地》, 单组 10 m 深垂直接地极的接地电阻为

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi * l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right), \quad (10)$$

式中: l 为单根垂直接地极深度, 10 m ;

d 为单根垂直接地极等效直径, 1.42 cm 。

通过式(10)可得, 接地电阻为 15.7Ω 。

依据国际标准 BS7430—2011《电气装置的保护接地实用规程》, 19组 10 m 深垂直接地极的接地电阻为

$$R_{zv} = \frac{R_v}{n} \left[1 + \frac{\rho}{\pi D R_v} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] = 1.19 \Omega, \quad (11)$$

式中: D 为垂直接地极的敷设间距, 15 m ;

n 为垂直接地极组数, $n=19$ 。

2) 变电站接地网的总接地电阻计算

$$R = \eta \frac{R_a \times R_{zv}}{R_a + R_{zv}} = 0.66 \Omega, \quad (12)$$

式中: R_a 为水平接地网接地电阻, 1.20Ω ;

R_{zv} 为垂直接地网接地电阻, 1.19Ω ;

η 为利用系数, 1.1 。

3.3.2 接地电阻校验

通过专业软件仿真建模, 接地电阻校验结果如表4所示。根据接地网的布置形式, 按照地表电阻率 $\rho=200 \Omega \cdot \text{m}$ 计算, 变电站接触电势允许值为 258.0 V , 计算值为 540.3 V , 不满足要求; 跨步电势^[15-16]允许值为 389.5 V , 计算值为 353.1 V , 满足要求。由于变电站所有设备布置在户内, 根据 DL/T621—1997《交流电气装置的接地》, 校验接触电势时, 按混凝土的电阻率 $3000 \Omega \cdot \text{m}$ 考虑, 则变电站接触电势允许值为 848.4 V , 即本方案中变电站接地网能满足要求。

表4 接地电阻校验表

Table 4 Grounding resistance check table

数值 类型	接触电势/V		跨步电 势/V	接触最大接地 电阻/ Ω		跨步最大 接地电阻 / Ω
	$\rho=200$ $\Omega \cdot \text{m}$	$\rho=3000$ $\Omega \cdot \text{m}$		$\rho=200$ $\Omega \cdot \text{m}$	$\rho=3000$ $\Omega \cdot \text{m}$	
允许值	258.0	848.4	389.5	0.32	0.73	1.04
计算值	540.3	540.3	353.1	0.66	0.66	0.66

4 结语

本文以湖南某 220 kV 变电站为基础, 研究设计了一套变电站三维立体接地网。若变电站仅采用水平不等间距接地网, 根据计算, 敷设完水平接地网后, 变电站地网接地电阻不能满足接触电势和跨步电压的要求, 需采取降阻措施。根据变电站土壤电阻率及周边情况, 采用超深垂直接地体降阻方案最符合情况, 敷设完镀锌铜接地棒后变电站接地电阻降至 0.66Ω 。因此, 采用复式不等间距网与超深垂直接地体相结合的三维立体接地网, 将接地网向纵深方向扩展, 入地短路电流通过垂直接地极流向大地深处, 满足安全运行要求。

参考文献:

- [1] 邵阿红, 叶永卫, 田二明. 变电站接地网降阻措施研究[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 96-100.
Shao Ahong, Ye Yongwei, Tian Erming. Research on Resistance Reduction Measures for Substation Grounding Network[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2012, 29(4): 96-100.
- [2] 蒋中红. 35 kV 变电站系统的综合自动化改造[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(5): 56-61.
Jiang Zhonghong. Synthesized Automation Reformation of 35 kV Transformer Substation System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(5): 56-61.
- [3] 水利电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册 1: 电气一次部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989: 907-913.
Northwest Electric Power Design Institute of Ministry of Water Resources. Electrical Power Engineering Design Manual 1: Electric Once Part[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1989: 907-913.
- [4] 廖无限, 周翔, 文定都, 等. 接地技术在电力电子技术实践应用中的探讨[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 65-69.
Liao Wuxian, Zhou Xiang, Wen Dingdou, et al. Discussion on Grounding Technology in the Power Electronic Technology Practical Application[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 65-69.
- [5] 李谦, 文习山, 肖磊石. 土壤特性对变电站接地网特性参数影响的数值表分析[J]. 高压技术, 2013, 39(11): 2656-2663.
Li Qian, Wen Xishan, Xiao Leishi. Numerical Analysis of Influence of Soil Characteristics on Characteristic Parameters of Substation Grounding Grid[J]. High Voltage Technology, 2013, 39(11): 2656-2663.

- 2013, 39(11) : 2656-2663.
- [6] 廖辉. 浅谈 110 kV 变电站接地网优化研究[J]. 黑龙江科技信息, 2010 (34) : 29.
Liao Hui. Discussion on the Optimization of Grounding Grid in 110 kV Substation[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010 (34) : 29.
- [7] 杨立成. 220 kV 变电站接地网设计与施工[J]. 企业科技与发展, 2013 (3) : 39-40.
Yang Licheng. Design and Construction for Grounding Grid of 220 kV Substation[J]. Enterprise Science and Technology and Development, 2013 (3) : 39-40.
- [8] Tang Bin, Sun Xu, Zou Jiayong. Overview of Method for Reducing Grounding Resistance of Substation Grounding System[C]//Proceedings of the 2015 International Symposium on Computers & Informatics. [S. l.] : Atlantis Press, 2015: 35-41.
- [9] 庞国栋. 220 kV 变电站接地网的设计[J]. 内蒙古石油化工, 2012 (12) : 95-99.
Pang Guodong. 220 kV Substation Ground Grid Design[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(12) : 95-99.
- [10] 杨晓雄, 彭敏放, 苗文华, 等. 变电站接地网优化设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 22(4) : 45-48.
Yang Xiaoxiong, Peng Minfang, Miao Wenhua, et al. Optimal Design of Grounding Grid for Substations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 22(4) : 45-48.
- [11] He Jinliang, Zeng Rong, Gao Yanqing, et al. Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2003, 18(3) : 788-795.
- [12] 中国电力企业联合会. 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, 2001: 28-31.
China Electricity Council. GB/T 50065 — 2011 Code for Grounding Design of AC Electrical Installations[S]. Beijing: China Planning Press, 2001: 28-31.
- [13] Chen Wenguang, Bi Ruyun, Wang Jian, et al. Review of Grounding Grids Corrosion Diagnosis[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2013, 5 (3) : 309-312.
- [14] 张晓玲, 黄青阳. 电力系统接地网故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(1) : 48-51.
Zhang Xiaoling, Huang Qingyang. Fault Diagnosis of Grounding Grid of Electric Power Plants and Substations [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2002, 14(1) : 48-51.
- [15] 高宜凡. 变电站接地网状态评估分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Gao Yifan. The Assessment and Analysis of Transformer Substation Grounding Grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [16] 郭建伟. 变电站接地网研究及故障诊断分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Guo Jianwei. Research on the Substation Grounding System and Analysis of the Fault Diagnosis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.

(责任编辑: 邓彬)