

降低季节性冻土地区接地电阻的方法研究

万收兰

(中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要: 提出了降低季节性冻土地区接地电阻的方法, 该方法结合多年来所积累的工程经验和参考资料, 并在不同季节性冻土地区设置方式的仿真计算和实例分析的基础上完成。降低季节性冻土地区接地电阻可以适当加长垂直接地极的长度, 使得垂直接地极至少深入到土壤电阻率较低的土壤层中2~3 m, 对以后的工程设计工作有一定的指导作用。

关键词: 季节性冻土; 接地装置; 土壤电阻率; 水平接地极

Measures to reduce grounding resistance in seasonally frozen soil region

WAN Shoulán

(Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China)

Abstract: The method of reducing the grounding resistance in seasonally frozen soil area is put forward, which is based on the accumulated reference materials for many years, and the simulation calculation and case analysis of different setting modes in seasonally frozen soil area. How to reduce the grounding resistance in seasonally frozen soil area the length of vertical grounding electrode can be appropriately lengthened, so that the vertical grounding electrode can penetrate at least 2~3 m into the soil layer with low soil resistivity. It can be used for reference in the future design work.

Key words: seasonal frozen soil; grounding device; soil resistivity; horizontal grids rods

0 引言

良好的接地网设计是一项重要的工作, 它必须在正常及事故状态下满足两个主要目标:

①将电流泄入大地, 使流经接地电阻产生的过电压不超过运行设备容许的限值; ②确保人站在接地设施附近不受电气冲击的危险^[1]。因此良好的接地系统是维护电力系统安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全的根本保证和重要措施^[2]。在土壤电阻率较低的地区, 由于各方面的限值条件比较宽松, 降低接地电阻、接触电势与跨步电压的难度并不是特别大; 但对于

土壤电阻率较高地区或季节性冻土地区, 主要是由于在温度的变化过程中出现土壤电阻率跳变的现象, 使得土壤电阻率大幅度增加。这不仅影响到接地电阻的数值, 也影响到接触电势和跨步电压的数值, 大大影响到季节性冻土地区接地系统的安全。如何设计接地系统以减小接地电阻, 减小接触电势和跨步电压, 减小季节性因素对接地系统的影响, 是本文需要解决的主要问题。通过对敷设于季节性冻土层内垂直接地极的仿真研究, 给出了季节性冻土地区的降阻措施及有效的降阻方案。

1 土壤的基础条件

1.1 土壤地址情况

根据项目详勘报告可将土壤定义为：砂土。且土壤含水率约为19%左右^[3]。

气象条件中土壤最大冻土深度为2 090 mm。

1.2 地温情况

地温标准值如表1所示。

1.3 土壤电阻率^[5]

砂土土壤电阻率18℃时为66 W·m；0+℃时为120 W·m；0-℃时为1 312 W·m；-5℃时为13 000 W·m（上层土壤-冻土层）。

表1 地温标准值

Tab. 1 Ground temperature standard

土壤深度/m	土壤温度/℃											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1.0	-5.0	-6.9	-2.9	-1.2	1.8	7.0	11.5	14.5	14.2	10.5	2.9	0.1
2.0	1.7	0.8	0.2	-0.6	-0.2	0.4	5.0	10.0	10.5	9.6	5.1	3.9
2.2	2.2	1.3	0.8	-0.2	+0.1	0.2	4.3	9.2	10.0	9.3	5.3	4.3

2 标准规范的要求

现行国家标准GB/T 50057—2010《建筑物防雷设计规范》^[6]第5.4.4条规定：“人工接地体在土壤中的埋设深度不应小于0.5 m，并宜敷设在当地冻土层以下，其距墙或基础不宜小于1 m。”其解释条文是根据IEC 62305-3:2010第26页的第5.4.3条制定的。现行国家标准GB/T 21714.3—2015《雷电防护 第3部分：建筑物的物理损坏和生命危险》^[7]第5.4.3条规定：“环形接地极(B型装置)的埋深至少为0.5 m，与外墙周围相隔约1 m。接地极的类型和埋深应尽可能使腐蚀、土壤干燥和冰冻的影响减到最小，从而使接地电阻值保持稳定。本部分认为垂直接地极处于冻上层的部分在结冰情况下是无效的。”

现行国家标准GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》^[8]第4.3.1条第6款规定在季节冻土或季节干旱地区可采用下列措施：①季节冻土层或季节干旱形成的高电阻率层的厚度较浅时，可将接地网埋在高电阻率层下0.2 m；②已采用多根深钻式接地极降低接地电阻时，可将水平接地网正常埋设；③季节性的高电阻率层厚度较深时，可将水平接地网正常埋设，在接地网周围及内部接地极交叉节点布置短垂直接地极，其长度宜深入季节高电阻率层下2 m。其解释条文有如下的描述：“在高土壤电阻率地区降阻的有效方法是采用长垂直接地电

极，结合分层土壤模型，有效地利用地下低电阻率层，以达到要求的降阻效果。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效应，以提高垂直接地极的利用系数，垂直接地极宜沿接地网的外围导体布置。如果条件许可，尽可能将垂直接地极向外布置，让垂直接地极间的距离不小于2倍垂直接地极的长度。但应考虑如下两点：一是垂直接地极根数增加到一定值时降阻率趋于饱和；二是长垂直接地极的施工费用比较高。

从标准规范的条文中可以看出，如果冻土层比较浅，不超过1 m的情况下，可以考虑将接地网埋设于冻土层之下；如果冻土层比较深，超过1.5 m的情况下，可以将水平接地网正常埋设，此时应布置垂直接地极其长度宜深入到冻土层之下2 m的位置。

3 垂直接地极的影响

3.1 垂直接地极的位置对接地电阻的影响

利用ETAP仿真计算软件，分析垂直接地极位置对接地电阻的影响。设置接地网的仿真模型为：其面积为60 m×60 m；水平均压带按10 m间距布置；接地极的埋设深度为1 m，垂直接地极分别布置在接地网不同位置，其长度为3.5 m，其等效半径为0.01 m；故障入网电流为0.2 kA。土壤的结构模型为：第一层土壤为冻土层，电阻

率为 $13\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}$ ，厚度为 $2.09\ \text{m}$ ，第二层土壤电阻率为 $66\ \text{W}\cdot\text{m}$ 。垂直接地极的位置分别设置在1~7接地网不同的位置上，如图1所示。利用ETAP仿真计算软件分别计算不同位置上的接地电阻，可得到如表2所示的计算结果。

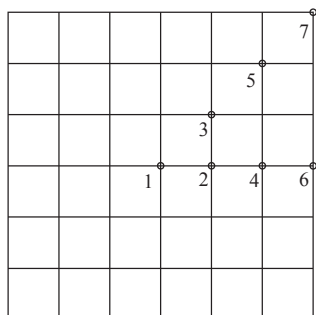


图1 垂直接地极的位置示意图

Fig. 1 Location of vertical grounding electrode

根据表2的参数绘制成如图2所示的曲线。从图1、图2和表2的结果可知，垂直接地极的位置从位置1到位置7，在逐步地远离接地网的中心，随着距离越来越远，其接地电阻值从大逐渐变小。这说明水平和垂直接地导体之间的屏蔽作用在逐渐减小。由此可知，要想充分利用垂直接地极的降阻作用，宜沿接地网将其布置在水平接地网的外围，减少屏蔽作用。

表2 接地电阻值1

Tab. 2 Grounding resistance 1

垂直接地极位置	1	2	3	4	5	6	7
接地电阻/ Ω	10.093	10.088	10.083	10.071	10.052	10.030	9.985

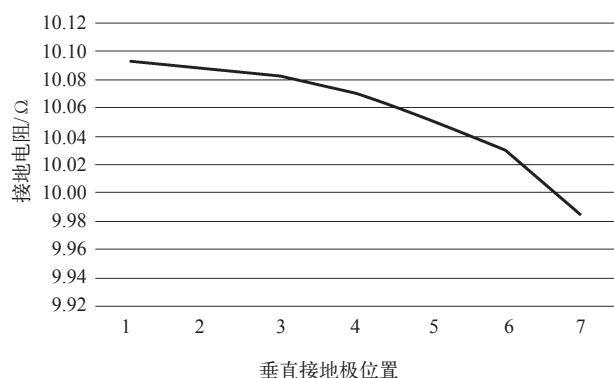


图2 垂直接地极位置对接地电阻的影响

Fig. 2 Curve of resistance based on different location of vertical grounding electrode

3.2 垂直接地极的长度对接地电阻的影响

利用ETAP仿真计算软件，分析垂直接地极长度对接地电阻的影响。设置接地网的仿真模型为：其面积为 $50\ \text{m} \times 30\ \text{m}$ ；水平均压带按 $10\ \text{m}$ 间距布置；接地极的埋设深度为 $1.0\ \text{m}$ ，垂直接地极分别布置在接地网边缘的四个角上，其数量为4根，其等效半径为 $0.01\ \text{m}$ ；故障入网电流为 $0.2\ \text{kA}$ 。土壤的结构模型为：第一层土壤为冻土层，电阻率为 $13\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}$ ，厚度为 $2.09\ \text{m}$ ，第二层土壤电阻率为 $66\ \text{W}\cdot\text{m}$ 。分别取垂直接地导体的长度分别为 $0\sim 50\ \text{m}$ 等不同的长度值。利用ETAP仿真计算软件分别计算不同长度接地极的接地电阻，可得到如表3所示的结果。

根据表3的参数绘制成曲线如图3所示。分析表3所得到的计算数据和图3可知，垂直接地极有明显的降阻效果，特别是当垂直接地极贯穿两层土壤，深入到冻土层以下时($2.09\ \text{m}$ 以下)，效果更明显，但当垂直接地极深入到冻土层以下超过 $3\ \text{m}$ 后，接地电阻的变化趋于缓慢，再加长垂直接地极的长度，降低接地电阻的效果已不明

表3 接地电阻值2

Tab. 3 Grounding resistance 2

垂直接地极长度/m	0	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
接地电阻/ Ω	174.5	174.5	31.37	16.35	11.34	8.78	7.22	6.62	5.4	4.81	4.35

垂直接地极长度/m	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50
接地电阻/ Ω	3.98	3.01	2.44	1.71	1.35	1.13	0.98	0.88	0.8	0.73	0.68

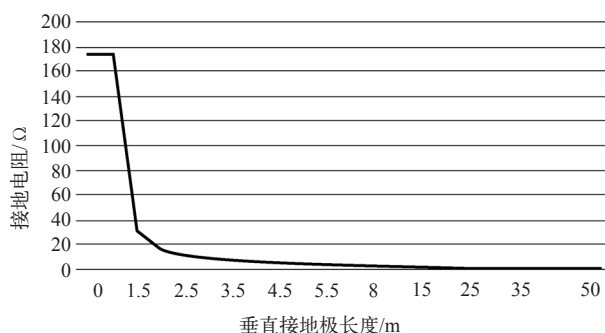


图3 垂直接地极的长度对接地电阻的影响

Fig. 3 Curve of resistance based on different length of vertical grounding electrode

显。所以在选择垂直接地极的长度时,要根据当地的实际情况例如冻土层的厚度进行选择。要保证垂直接地极能够深入到电阻率较低的土壤层(其长度宜深入季节高电阻率层下面2 m),这样才能利用下层土壤的低电阻率区域的散流作用,达到降低接地电阻的效果。另一方面,埋设垂直接地极时需要进行打孔,深度越大费用就会越高,所以为了节省投入成本,提高经济效益,需要选择合适的垂直接地极长度,最大限度地利用垂直接地极的降阻作用。

3.3 垂直接地极的数量对接地电阻的影响

利用ETAP仿真计算软件,分析垂直接地极数量对接地电阻的影响。设置接地网的仿真模型为:其面积为 $50\text{ m} \times 30\text{ m}$;水平均压带按10 m间距布置;接地极的埋设深度为1 m,垂直接地极尽可能向外布置,即接地网边缘上,其长度为3.5 m,其等效半径为0.01 m;故障入网电流为0.2 kA。土壤的结构模型为:第一层土壤为冻土层,电阻率为 $13\ 000\ \text{W} \cdot \text{m}$,厚度为2.09 m,第二层土壤电阻率为 $66\ \text{W} \cdot \text{m}$ 。分别取垂直接地导体的数量分别为0、3、6、9、12、15、18、21和24。利用ETAP仿真计算软件分别计算它们的接地电阻,可得到如表4所示的结果。

根据表4的参数绘制成曲线如图4所示。从表4中可以看出,当垂直接地极深入到下层低电阻率区域,并且布置在水平接地网边缘上时,随着垂直接地极数量的逐渐增加,接地网的接地电阻会显著下降。由此可知,垂直接地极对降低接地电阻的数值有明显的作用。从图4中可以看出,随着垂直接地极数量的逐渐增多,其降阻的效果也逐渐进入到平缓的走势,表明垂直接地极的利用率在减小,究其原因是随着垂直接地极数量的不断增加,它们之间的距离会逐步缩小,增大了相互之间的屏蔽作用。由于长垂直接地极的施工费用比较高,所以要根据工程的实际情况选择合适的垂直接地极数量,以便在充分利用垂直接地极降阻效果的同时,减少一次投入的成本。

表4 接地电阻值3

Tab. 4 Grounding resistance 3

垂直接地极数量/个	0	1	2	3	6	9	12	15	18	21	24
接地电阻/ Ω	174.5	17.08	9.06	6.26	3.45	2.54	2.09	1.83	1.66	1.54	1.45

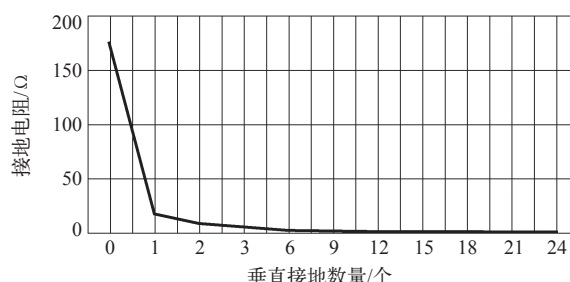


图4 垂直接地极的数量对接地电阻的影响

Fig. 4 Curve of resistance based on different numbers of vertical grounding electrode

4 工程实例

利用ETAP仿真计算软件,计算某工程35 kV变配电所的接地电阻。该35 kV变配电所接地网的面积为: $50\text{ m} \times 30\text{ m}$;水平均压带按10 m间距布置;接地极的埋设深度为1 m,其等效半径为0.014 m;垂直接地极布置在接地网的网格边缘,其长度为3.5 m,其数量为3组(9根);故障入网电流为0.2 kA。土壤的结构模型为:第一层土壤为冻土层,电阻率为 $13\ 000\ \text{W} \cdot \text{m}$,厚度为2.09 m;第二层土壤电阻率为 $66\ \text{W} \cdot \text{m}$ 。利用ETAP仿真计算软件计算其接地电阻,计算结果如图5左半部分所示。



图5 优化前后的计算结果

Fig. 5 Optimized calculating results

从计算结果可以看出,接地电阻的数值满足标准规范的要求,但是最大的接触电压超过允许的限值,需要对接地网进行优化;将水平均压带的布置由10 m间距布置改为5 m间距布置,优化后的计算结果如图5右半部分所示。

5 结束语

我国幅员辽阔,自然地理环境差异也很明显,很多地区在气温偏低时,土壤地表的电阻率增大,而且土壤也明显分为两层,即上层土壤在某个季节有冻土层存在,在另外的季节又与下层土壤保持一样。由上述分析可知,冻土层的土壤电阻率会跳变,保持很高的数值,有着明显的抑制散流作用。为使接地网的接地电阻满足现行标准、规范的要求,保障设备和人身安全,需要采取降阻措施。

如果季节性冻土层深度比较浅(不超过1 m),可以考虑按照国家标准的要求将接地网埋设于冻土层之下(即埋设于土壤电阻率较低的土壤层),便于接地网的散流,以减小因季节性冻土层造成该土壤电阻率急剧升高所带来的影响。

如果冻土层比较深时,需要跨越冻土层,会给施工带来很大的难度,进而提高一次投入成本,得不偿失。特别是当石化装置或变电所位于季节性冻土地区,只有在某个季节气温比较低的情况下,会造成接地网的电阻值达到很大的数值,此时应采取降阻措施。可以适当地加长垂直接地极的长度,使得垂直接地极至少深入到土壤电阻率较低的土壤层中2 m,也可采用其他的降阻方法如加降阻剂等。在制定接地方案时应通过技术经济比较,综合考虑各种降阻方案的优缺点,

因地制宜,根据现场的实际情况进行选择。

参考文献

- [1] 李增. 复杂土壤地区接地网电气特性的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [2] 陈先禄, 刘渝根, 黄勇. 接地[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [3] 战广深, 殷正安. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 土壤通报, 1996, 22(9): 1-6.
- [4] 陈逢久, 姜洪举, 程恩远. 大庆地区地温特点及地温标准值[J]. 油田地面工程, 1989, 8(6): 73-76.
- [5] 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 1-6.
- [6] 建筑物防雷设计规范: GB/T 50057—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [7] 雷电防护 第3部分: 建筑物的物理损坏和生命危险: GB/T 21714.3—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [8] 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

作者简介



万收兰

万收兰(1971—),女,硕士,高级工程师,注册电气工程师(供配电),长期从事电气设计工作。

(收稿日期: 2020-02-27) **EA**