

接地模块接地工频电阻计算及在送电线路中的应用

徐宏宇

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要:送电线路的接地装置是导泄雷电流入地,保持线路耐雷水平的重要措施。就常规接地方式难以施工及难以满足接地工频电阻的问题,对接地模块的接地电阻计算及应用做了分析。

关键词:接地模块;接地工频电阻计算;送电线路

Abstract: The earthing device in transmission line is a very important measure to lead the thunderstorm electricity to the earth and to maintain the lightning impulse withstand level of the transmission line. The calculation of earthing resistance of the earthing module and its application are analyzed in order to solve the problems that the conventional earthing mode is difficult to be constructed and it is hard to meet the requirements of the earthing resistance at the same time.

Key words: earthing module; earthing power-frequency resistance calculation; transmission line

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0078-05

0 概述

处于山区地段的送电线路,其塔位受到地势所限常常选择在狭窄的山脊上、陡坡边,而塔位多为高土壤电阻率地质,常规的水平敷设式的接地装置施工难度大,且部分塔位根本就无法实施。

为解决此问题,以往采用的手段通常是使用降阻剂,但降阻剂有几个不利之处:①施工难度大,效果不好;②采用降阻剂后,由于水土流失和降阻剂性能变化,经过一定时间运行后,接地电阻难以保持施工验收时的要求值,给运行维护带来困难;③降阻剂存在腐蚀性,降阻效果越好的腐蚀性越大,而腐蚀性较小的降阻效果较差。现在部分厂家开发了新型的物理降阻剂,不含有腐蚀性的盐酸盐,但降阻效果持续时间还需要在工程中观察。

多年来,众多工程证明降阻剂的使用可以降低接地电阻。但是存在很多问题。而接地模块克服了上述问题,使降阻剂成为标准产品,而不是半成品,大大减少了对施工的依赖性。接地模块是选用性能稳定的低阻材料,科学配以多种防腐、保水、扩散、胶凝材料,经几十吨机械压力成型。它比凝固后的降阻剂更密实,导电率更高,防腐性更好,施工更方便,更环保。

1 接地工频电阻计算方法

接地工频电阻是接地装置安装后,能否满足设计要求的量化标准。接地工频电阻计算方法如下。

1.1 建立接地装置布置形式

接地工频电阻与接地装置的布置形式是密切相关的,因此需在接地装置的布置形式已建立的基础上计算相应的接地工频电阻。

型 号	甲-1	乙-1	丙-1	丁-1
土壤电阻率(欧·米)	100及以下	100~300	300~500	500~1000
杆塔型式	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图 (单位:米)				
最大允许工频电阻(欧)	5	10	12	15

图 1 500 kV 线路接地装置安装图

以 500 kV 线路为例, 工程中常用的接地装置形式如图 1 所示。

1.2 计算方法

对接地工频电阻的计算有两种方法, 一种是利用系数法, 一种是电阻系数法。

1.2.1 利用系数法

①对甲-1 典型的引下线结合接地环的接地形式见图 2。

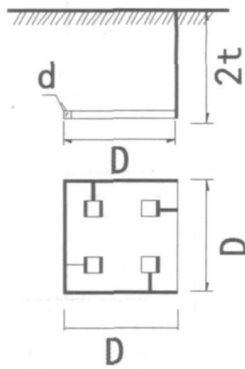


图 2 甲-1 接地装置布置图

工频电阻 R_m 计算式为

$$R_m = \frac{R_A \times \frac{R_B}{n}}{R_A + \frac{R_B}{n}} \times \frac{1}{\eta} \quad (\Omega) \quad (1)$$

式 (1), R_A ——深埋环的工频电阻值, 其计算式见式 (2);

R_B ——引下线的工频电阻值, 其计算式见式 (3);

n ——引下线的数量;

η ——工频利用系数, 取值范围 0.55~1。

深埋环的工频电阻值 R_A 计算式为

$$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \times \left(1n \frac{8D}{d} + \frac{\pi D}{4t} \right) \quad (\Omega) \quad (2)$$

式 (2), ρ ——计算用土壤电阻率, $\Omega \cdot m$;

D ——环的直径, m;

d ——接地体的直径, m;

t ——地面至接地体的半间距离, m。

引下线的工频电阻值 R_B 计算式为

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi l} \times \left(1n \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\Omega) \quad (3)$$

式 (3) 中, l ——引下线的埋深, m

其余参数同式 (2)。

②对乙-1 典型的在引下线和接地环的基础上再使用水平射线的接地形式见图 3。

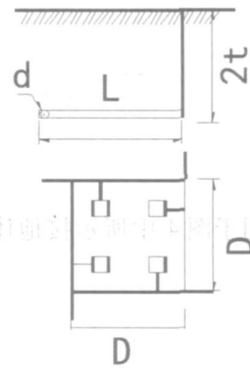


图 3 乙-1 接地装置布置图

工频电阻 R_n 计算式为

$$R_n = \frac{R_c \times \frac{R_D}{n}}{R_c + \frac{R_D}{n}} \times \frac{1}{\eta} \quad (\Omega) \quad (4)$$

式 (4), R_c —— n 根水平射线的工频电阻值, 其计算式见式 (5);

R_D ——引下线和接地环组合后的工频电阻值, R_D 即 R_m , 其计算式见式 (1);

n ——引下线的数量;

η ——工频利用系数, 取值范围 0.55~1。

水平射线的工频电阻值 R_c 为

$$R_c = \frac{R_E}{n} \times \frac{1}{\eta} \quad (\Omega) \quad (5)$$

式 (5) 中 R_E 见式 (6), 其余各项参数同前。

R_E 为单根水平接地体的工频电阻值, 其计算式为

$$R_E = \frac{\rho}{2\pi l} \times 1n \frac{8l}{td} \quad (\Omega) \quad (6)$$

式 (6) 中, l 为单根水平接地体长度 (m), 其余参数同前。

1.2.2 电阻系数法

①对甲-1 型的接地形式, 其接地示意图同图 2。

工频电阻 R_m 计算式为

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(1n \frac{L^2}{td} + A \right) \quad (\Omega) \quad (7)$$

式 (7), ρ ——计算用土壤电阻率, $\Omega \cdot m$;

L ——水平接地体的总长度, m;

d ——水平接地体的直径或等效直径, m;

t ——水平接地体的埋深距离, m;

A ——水平接地体的形状系数, 其取值见图 4。

②对丁-1 型的接地形式见图 5。

接地体的形状										
A	-0.6	-0.18	0	0.89	3.03	5.65	1	0.48	2.19	4.71

图 4 水平形状系数 A 值取值图

式 (7) 仅适用于图 4 中所示接地体形状的接地电阻计算, 而对如丁-1 式的典型风车式接地装置则按式 (8) 计算。

$$R_n = \frac{\alpha_{11} + \alpha'_{11} + 4\alpha_{12} + 2\alpha_{13}}{4} (\Omega) \quad (8)$$

式 (8) 中各项参数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \\ \alpha'_{11} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{2t} \\ \alpha_{12} = \frac{\rho}{4\pi l^2} [D \operatorname{sh}^{-1} \frac{l}{D} + l \operatorname{sh}^{-1} \frac{D}{l} + \\ \quad l \operatorname{sh}^{-1} \frac{l}{b} + l \operatorname{sh}^{-1} \frac{b}{l}] \\ \alpha_{13} = \frac{\rho}{4\pi l^2} [(1+b) \times \\ \quad \ln \frac{(1+b) + \sqrt{(1+b)^2 + D^2}}{b + \sqrt{b^2 + D^2}} + \\ \quad D \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + D^2}}{D(\sqrt{2}-1)} + 2\sqrt{b^2 + D^2} - \\ \quad D\sqrt{2} - \sqrt{(1+b)^2 + D^2}] \end{array} \right. (\Omega) \quad (9)$$

式 (9) 中, α_{11} 为当 $e \geq 2$ 时的计算式。

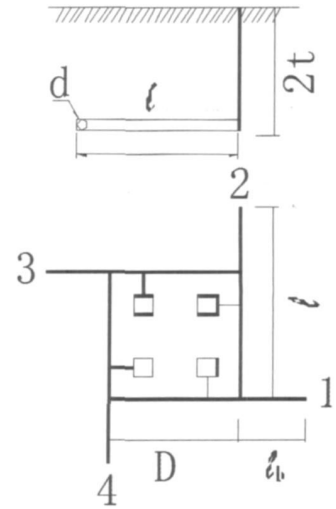


图 5 丁-1 接地装置布置图

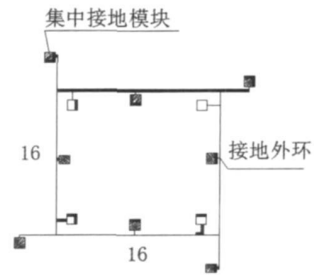


图 6 甲-A 集中接地装置布置图

2 接地模块的接地工频电阻计算

2.1 建立使用接地模块的接地装置布置形式

带接地模块的接地装置其适用范围多为山区地段场地狭小的塔位, 根据图 1 所示的常规接地装置安装图, 接地模块同甲-1 式的接地装置结合使用是最为符合现场实际情况的, 其接地装置布置见图 6。

2.2 对使用模块的集中接地装置的接地工频电阻计算方法

对图 6 所示的甲-A 型接地装置布置形式, 可视为接地闭合环网同接地模块并联, 因此可分别计算各自的工频电阻后, 再计算其并联后的工频电阻。

①对甲-A 接地装置的接地工频电阻计算方法如下。

对闭合网的计算公式为式 (7), $R_n = \frac{\rho}{2\pi L} \times (1_n \frac{L^2}{td} + A) (\Omega)$;

单个接地模块的接地工频电阻为 R_c (由接地模块生产厂家给出);

n 个接地模块组合后的接地工频电阻为

$$R_{\text{总}} = \frac{R_c}{n \times \eta} (\Omega) \quad (10)$$

则甲-A 型接地工频电阻为

$$R = \frac{R_m \times R_c}{R_m + R_c} (\Omega) \quad (11)$$

②计算实例

以代号 GD-04F44 低阻模块作为计算用接地模块, 接地土壤电阻率 $\rho=1000$, 接地水平体采用 D10 圆钢, 其埋设深度为 0.6 m。

型 号	甲-A	乙-A	丙-A
土壤电阻率(欧·米)	500~1000	1000~2000	2000及以上
杆塔型式	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图 (单位:米)			
最大允许工频电阻(欧)	15	20	27
集中接地模块(套)	8	12	16

图 7 500 kV 线路集中接地装置安装图

甲-A型闭合网接地工频电阻为

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \times (1n \frac{L^2}{4d} + A)$$

$$= \frac{1000}{2 \times \pi \times 64} \times (1n \frac{64^2}{0.6 \times 0.01} + 1) = 35.9 (\Omega)$$

GD-04F44 单个接地模块的接地工频电阻为

$$R_e = 0.158 \rho = 158 (\Omega)$$

8 个接地模块组合后的接地工频电阻为

$$R_{组} = \frac{R_e}{n \times \eta} = \frac{158}{8 \times 0.7} = 28.2 (\Omega)$$

则甲-A型接地工频电阻为

$$R = \frac{R_m \times R_e}{R_m + R_e} = \frac{35.9 \times 28.2}{35.9 + 28.2} = 15.8 (\Omega)$$

计算结果满足规程要求。

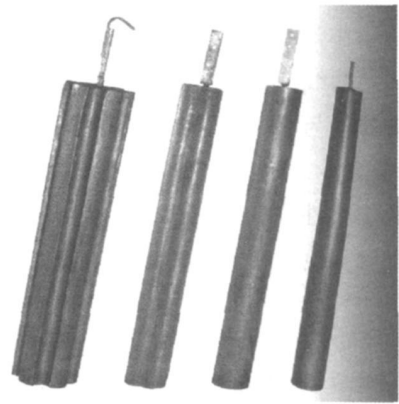


图 8 圆柱状接地模块

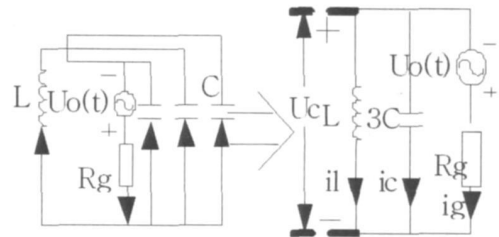


图 9 块状接地模块

3 接地模块的应用

3.1 使用接地模块的集中接地装置布置形式

随着接地模块在工程中越来越多的使用,通过不断的总结与改进,目前工程实际中常用的集中接地装置布置图如图 7。接地模块主要形式如图 8、图 9。

3.2 接地模块的主要性能特点

- ① 接地模块与大地接触面积较大;
- ② 接地模块拥有极强的吸湿、保湿的作用,可降低附近土壤的电阻率;
- ③ 接地模块耐腐蚀性能很强,其理论使用寿命大于 50 年,且无污染;
- ④ 接地模块在经历多次大电流冲击后,模块电阻值不增大,也无变硬、发脆,无断裂现象;
- ⑤ 接地模块以固定状态“块”或“棒”为单位,运输及施工均较方便,可根据现场实际情况选择安装位置,并灵活选择安装方式为水平或垂直。

3.3 接地模块施工要求

为充分发挥接地模块的作用,实现设计指标,对接地模块施工应作如下要求。

- ① 接地模块与水平接地圆钢的连接需扁钢焊接,元件连接处的焊接不得虚焊、漏焊。焊后应清除焊接处的焊渣,并涂上沥青或防腐漆;
- ② 接地模块的敷设坑须比接地模块大 200 mm;
- ③ 接地模块敷设前,应在坑底填约 200 mm 厚的粘土层,再放入模块并压实,可浇水使模块下沉与土壤紧密接触,然后逐层回填压实,最后再一次浇水使回填土下沉;
- ④ 接地模块敷设间距须大于 3 m,以减小接地模块相互间的屏蔽效应;

⑤ 接地电阻测试应在接地模块吸湿 72 h 后进行;

⑥ 实测接地电阻不合格时,可采取增加接地模块的方法,在已敷设好的接地装置上补接接地模块直至合格为止。

4 总 结

综上所述,接地模块作为近年来出现的一种特殊结构的长效物理降阻剂,对于位于山区或城市规划区等复杂地形和缺水地区的塔位,接地模块的使用可有效降低接地工频电阻,同时具有耐腐蚀、无污染、运输

和施工简单、使用寿命长的鲜明特点。

参考文献

- [1] 东北电力设计院编. 电力工程高压架空送电线路设计手册 (第二版) [S]. 1999.
- [2] DL/T 621—1997, 交流电气装置的接地 [S].
- [3] DL/T 5092—1999, 110~500kV 架空送电线路设计技术规程 [S].

作者简介:

徐宏宇 (1972—), 工程师, 从事高压送电线路设计。

(收稿日期: 2009—03—05)

(上接第 74 页)

检测川小沟头 8 与其他所有发电机的功角曲线, 78% 的功角曲线都能检测到频率为 1.104 Hz 的模式, 川小沟头 8 只与 32 台发电机的功角曲线上检测不到这个模式。

其他相关性强的发电机, 如川小关子、川冷竹关、川自一里与其他所有发电机的功角曲线, 也有 65% 以上的能检测到这个模式。

川水牛家 ($P_n = 35 \text{ MW}$) 出口变压器附近施加小扰动时, 在它与二滩 01 ($P_n = 550 \text{ MW}$) 的功角曲线上也能检测到 1.104 Hz 的模式, 且能量最大。

应用的方法检测小干扰下的主导低频振荡模式可以得到与文献 [10] 一致的结果, 从而验证了所提方法在研究主导低频振荡模式对系统动态特性和稳定性问题上的正确性。

4 结 论

(1) 提出了一种新的检测小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机方法, 所提方法可有效用于电力系统仿真曲线研究主导低频振荡模式中, 也可用于实际的功角曲线。所提出的方法, 无需对全网进行计算, 只获取系统的功角振荡波形, 算例结果表明, 所提方法有着较高的准确性, 且计算量小, 为实际系统的检测提供了有效途径。

(2) 对中国电力科学院 8 机 36 节点系统进行研究, 发现并不是在所有功角曲线都能, 而且任一条功角振荡曲线也不能检测到所有模式; 在特定故障下, 可以在特定的功角曲线上检测到小干扰下区域间主导低频振荡模, 此模式外, 还存在其它模式, 这些模式在系统振荡中虽然未能起主导作用, 但可以在某些条件下被

强烈激发出来, 也可以在特定的振荡曲线上检测到这些模式。

参考文献

- [1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—4.
- [2] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1—3.
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6—11.
- [4] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60—64.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21—25.
- [6] 中国电力科学研究院, 《电力系统分析综合程序》(PSASP6.24) 用户手册 [Z].
- [7] 穆钢, 王宇庭, 安军, 等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 7—11.
- [8] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的电力系统主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报. (已录用)
- [9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
- [11] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78—83.

作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析;

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—06—10)