



特高压输变电工程 接地研究与实践

张建坤 常敏 王建平 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压输变电工程 接地研究与实践

张建坤 常敏 王建平 编著

TM 723

08



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是在对输变电工程接地技术,特别是特高压输变电工程的接地技术全面系统研究和实践的基础上完成的,书中指出了接地技术存在的问题以及制约当前电网接地技术的因素,引入一部分国际先进的科学理念,提出了输变电工程安全接地技术体系,并经过工程实践,可帮助读者快速掌握卓越的接地技术。

本书共分12章,包括概述,土壤电阻率测量和分析,接地电阻常用计算公式,接地设计,接地电阻值测量,接地材料的选择,发电厂、变电站接地,输电线路接地,特高压输变电工程接地,通信接地,综合接地及复合接地体应用,降低接地电阻及延长接地体电阻寿命的有效方案。

本书提供了大量最具代表性的详实的工程案例,给出了接地模块的计算公式,可有效解决输变电工程接地难题。

本书可供从事特高压输变电工程科研、设计、施工、运行和维护等方面的技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

特高压输变电工程接地研究与实践/张建坤,常敏,王建平编著. —北京:中国电力出版社,2014.4

ISBN 978-7-5123-5797-6

I. ①特… II. ①张… ②常… ③王… III. ①特高压输电-配电系统-接地保护装置②变电所-配电系统-接地保护装置 IV. ①TM723

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 075063 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 11.75印张 157千字

印数 0001—1500册 定价 36.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

智能电网要求具有坚强的电网基础设施体系和技术支撑体系，而良好的接地系统是电网基础设施体系的重要环节，通过强化网、站、厂接地系统，可有效提高电力系统安全运行水平。在发生紧急状况时能保障主网安全稳定运行。

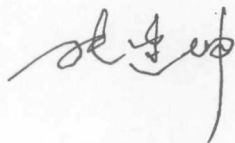
一般的接地公式只适合简单、规则的接地极，若接地极形状稍微复杂一点，就无现成公式可用，而需要专门推导公式来计算，过程相当复杂，甚至不可能实现。本书将向读者介绍一套明确的理论体系，通过学习，使工程专业人员掌握可解决绝大多数接地难题的技能。

本书对近 10 年中国输变电工程特别特高压输变电工程的经验进行了总结。还提供了几个发电厂、通信工程的接地实例，便于读者全面理解接地技术。

尽管国内接地方面书籍已有多本，但基本上以理论为主，不方便直接应用于工程建设。本书是经过理论研究及工程实践总结的成果，为的是更好地方便工程应用，可以更好地满足工程建设、设计、施工的实际需求。

本书的主要编著人员为张建坤。在编写过程中，得到了全国多家知名高校教授、学者对接地研究方面的意见和建议，在接地技术研究过程中得到了许多接地材料厂家、电力基建单位以及试验机构的大力协助，在此一致表示感谢。

由于经验和水平有限，书中难免有疏漏或不妥之处，敬请广大读者提出宝贵意见。



2014 年 3 月

目 录

前言

1 概述	1
1.1 常用配电用电设备的接地	2
1.2 用于保障人身安全的接地	7
1.3 发电厂、变电站接地	9
1.4 防雷保护——接地的延伸	12
2 土壤电阻率测量和分析	14
2.1 单极法	14
2.2 文纳四极法	15
2.3 视在电阻率	16
2.4 软件程序——解决接地技术的必要工具	20
2.5 接地网设计中电阻率分层解析	21
3 接地电阻常用计算公式	31
3.1 半球、圆盘工频接地电阻计算公式	31
3.2 常用人工接地极工频接地电阻计算公式	32
3.3 架空输电线路杆塔工频接地电阻计算公式	33
3.4 网状接地极接地电阻计算公式	34
3.5 变电站接地电阻计算公式	36
3.6 两层土壤的接地电阻计算公式	39

3.7	接地模块接地电阻计算公式	41
4	接地设计	43
4.1	接地设计总则	43
4.2	水平接地极和垂直接地极设计原则	48
4.3	简单有效的接地形式	55
4.4	垂直接地极	60
4.5	半球接地极	65
4.6	闭合地网——平板	65
4.7	有关降阻剂的研究	67
4.8	有关接地模块的研究	68
4.9	组合接地板	76
5	接地电阻值测量	80
5.1	三极法	80
5.2	输电线路杆塔接地装置的接地电阻测量	82
5.3	DL/T 475—2006 的改进以及接地电阻测量的普遍问题	83
6	接地材料的选择	85
6.1	接地材料的选择原则	85
6.2	接地材料截面积的选择	96
6.3	特高压输变电工程接地材料的选择	100
7	发电厂、变电站接地	103
7.1	常规接地网	104
7.2	长垂直接地极	104
7.3	无开挖深埋辐射形接地技术	109
7.4	变电站接地的几个重要问题	113

7.5	220kV 变电站接地方案及分析	118
8	输电线路接地	129
8.1	接地电阻要求	129
8.2	接地方案设计及计算	131
8.3	双回 500kV 输电线路接地装置及分析	132
8.4	500kV 改建输电线路接地装置及分析	135
8.5	220kV 输电线路接地装置及分析	137
9	特高压输变电工程接地	143
9.1	特高压交流输变电接地设计	143
9.2	特高压直流输电工程接地设计	145
10	通信接地	152
10.1	关于对接地网的要求	153
10.2	关于对接地电阻值的要求	155
10.3	其他有关接地的细节问题分析	158
11	综合接地及复合接地体应用	163
11.1	网状接地案例	163
11.2	辐射形接地案例	164
11.3	复合接地体的应用情况	165
11.4	具有最佳性价比的接地材料应用方案	169
12	降低接地电阻及延长接地体寿命的有效方案	170
12.1	降低接地电阻的技术措施	170
12.2	延长接地体寿命的有效方案	171
	参考文献	179

概 述

不同的规范对接地的定义不尽相同，一般认为，接地是电气设备的可导部分与地（或可用来代替地的导体）的电气连接。DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》对接地的定义如下：将电力系统或建筑物中电气装置、设施的某些导电部分，经接地线连接至接地极称为接地。其中，对接地极、接地线的定义分别如下：

（1）接地极。埋入地中并直接与大地接触的金属导体，称为接地极。兼作接地极用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建（构）筑物的基础、金属管道和设备等称为自然接地极。

（2）接地线。电气装置、设施的接地端子与接地极连接用的金属导电部分。

只要用电，就有电位差，若电位差因故障出现在不该出现的地方，会导致危险甚至致命，如电热水器漏电导致电位差转移至人体，则有可能造成致命的后果。然而，故障却是无法绝对避免的，为此，必须有合理的接地系统，并以最快的方式消除这些可能产生的故障电流，为此，就得有最低的接地电阻值。

DL/T 621—1997 中，按照用途将接地分为以下 4 类：

（1）工作（系统）接地。在电力系统电气装置中，为运行需要所设的接地（如中性点直接接地或经其他装置接地等）。

（2）保护接地。电气装置的金属外壳、配电装置的构架和线路杆塔等，由于绝缘损坏有可能带电，为防止其危及人身和设备的安全而设的接地。

(3) 雷电保护接地。为雷电保护装置(避雷针、避雷线和避雷器等)向大地泄放雷电流而设的接地。

(4) 防静电接地。为防止静电对易燃油、天然气储罐和管道等的危险作用而设的接地。

本章介绍几种最常见接地类型。

1.1 常用配电用电设备的接地

常用配电用电设备是指用于配电和用电的所有设备,包括变压器、控制电器、保护设备、测量仪表、线路器材和用电设备(如电动机、家用电器)等。接地最重要的一大作用就是保护人身安全,这非常必要,然而却常常被忽视。

《2005年中国家庭用电环境调查报告》显示,在全国20多个城市2386户被调查家庭中,1267户家庭无接地线或接地不可靠,占被调查总数的53%。如果算上农村家庭,比率会更大。

这就是说,绝大多数家庭缺少最后一道用电安全保险措施——接地。一旦电气设备出现了故障,金属壳带电,将会极大地增加用户触电致伤、致死的风险。事实上,这样的事故年年都有报道。关于电器漏电致人死亡的事故,以电热水器最多,那么,有效接地是如何降低上述触电风险的呢?一般的,家庭用户通过低压(380V/220V)系统配电,低压系统的接地形式一般分为TN、TT、IT3种,而TN系统又分为TN-C、TN-S、TN-C-S3种,下面将结合最常见的两种形式——TT、TN-S展开讨论。

1.1.1 TT 接地系统

TT接地系统有一个直接接地点,电气装置的外露导电部分应接至独立于电源系统接地的接地极上。TT接地系统接线图如图1-1所示。

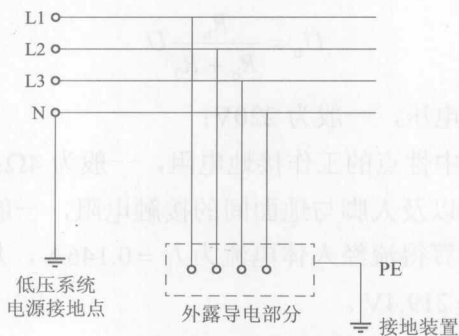


图 1-1 TT 接地系统接线图

一旦外漏导电部分因故障带电，人体触及后，良好的接地装置可大大减少通过人体的电流，降低触电的危害。无接地保护电路示意图如图 1-2 所示。

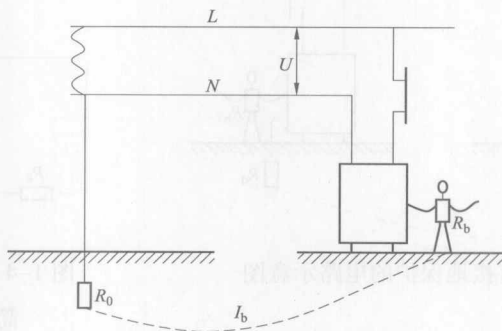


图 1-2 无接地保护电路示意图

若无接地保护，电气设备因绝缘损坏等致使外露导电部分带电，其上会长期存在电压，一旦有人人员触及，电流将会流经人体（见图 1-2），其值为

$$I_b = \frac{U}{R_b + R_0}$$

附加在人体上的电压值为

$$U_b = \frac{R_b}{R_b + R_0} U$$

式中 U ——电源电压，一般为 220V；

R_0 ——电源中性点的工作接地电阻，一般为 4Ω；

R_b ——人体以及人脚与地面间的接触电阻，一般为 1500Ω，代入可计算得流经人体电流为 $I_b = 0.146\text{A}$ ，加在人体上电压为 $U_b = 219.4\text{V}$ 。

该值接近电源电压，严重危及人体安全。

对有接地保护的电路，其电路示意图如图 1-3 所示，接地电阻为 R_d ，其简化电路图如图 1-4 所示。

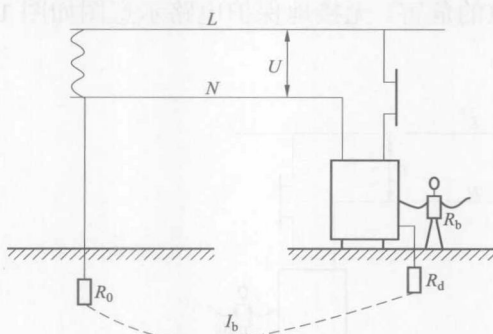


图 1-3 有接地保护的电路示意图

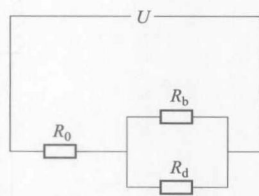


图 1-4 有接地保护的简化电路图

此时附加在人体上的电压为

$$U_b = \frac{\frac{R_b R_d}{R_b + R_d}}{R_0 + \frac{R_b R_d}{R_b + R_d}} U \approx \frac{R_d}{R_0 + R_d} U$$

取 $R_0 = 4\Omega$ 、 $R_d = 1\Omega$ ，则此时附加在人体上的电压为 $U_b \approx \frac{1}{5} U = 44(\text{V})$ 安全系数将会大大提高。

事实上, GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》要求, TT 接地系统中电气装置外露导电部分应设保护接地的接地装置, 其接地电阻与外露导电部分的保护导体电阻之和, 应符合下式的要求

$$R_A \leq 50/I_a$$

式中 R_A ——季节变化时接地装置的最大接地电阻与外露可导电部分的保护导体电阻之和, Ω ;

I_a ——保护电器自动动作的动作电流, 当保护电器为剩余电流保护时, I_a 为额定剩余电流动作电流 $I_{\Delta n}$, A。

换言之, 符合 GB 50065—2011 的 TT 接地系统可以将故障时设备外露导电部分的对地电位控制在 50V 以下, 极大地降低了触电风险。不过, 这通常需要较低的接地电阻值。如工作接地电阻值 $R_0 = 4\Omega$, 则保护接地电阻值需降至

$$R_d = 4 \times \frac{50}{220 - 50} \approx 1.2 (\Omega)$$

实现如此低的接地电阻值, 需要较高的投资, 而且如果该接地系统位于高电阻率区域, 则很难达到上述保护接地电阻值。另外, 如果故障产生的对地电位低于 50V, 保护设备则可能不动作, 对地电位将长期存在, 无法彻底消除隐患。为此, 就得采取更加灵活、实用的 TN 接地系统。

1.1.2 TN-S 接地系统

TN 接地系统电源处有一点直接接地, 装置的外露导电部分用保护线与该点连接。一般分 TN-S、TN-C-S、TN-C 三种基本类型。下面以 TN-S 接地系统为例展开讨论。

整个 TN-S 接地系统的中性线与保护线是分开的, TN-S 接地系统接线图如图 1-5 所示。TN-S 接地系统事故电流路径如图 1-6 所示。

接地保护是在确保人身和设备最大安全的情况下, 使故障电流流回电源, 只要条件允许, 任何系统均应有保护接地, 接地电阻值越低越好。TT 型接地装置可以使得故障电流更快地通过接地体、大地流回电源, 从

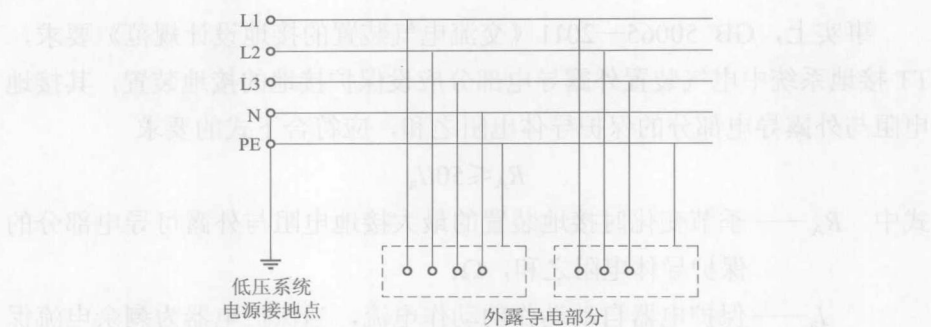


图 1-5 TN-S 接地系统接线图

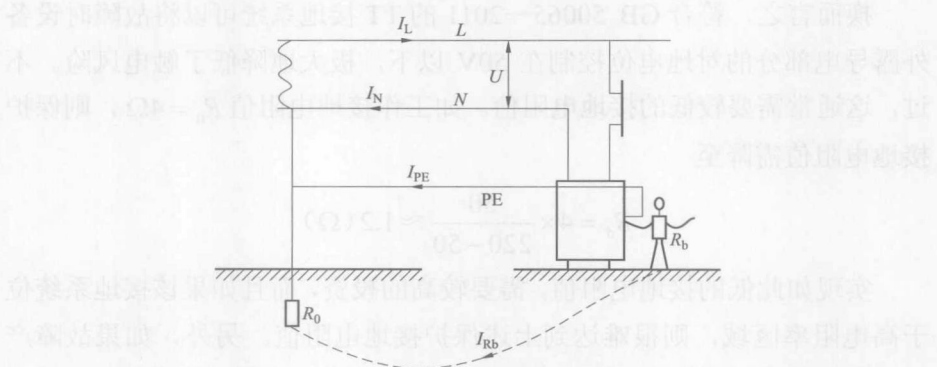


图 1-6 TN-S 接地系统事故电流路径图

而使得流经人体的电流大大减小；而 TN 型接地装置则可使得故障电流直接通过保护线（图 1-6 中的 PE 线）流回电源，此时相当于短路，过大的电流可使保护设备快速动作，切除故障。因此，TN 接地系统更加方便、安全，尤其是 TN-S 接地系统为民用建筑所广泛采用。

GB 50065—2011 认为，TN-S 接地系统装置中的 PE 线可另外增设接地。常有设计方规定 TN-S 接地系统装置中的 PE 线必须增设接地，且接地电阻值需小于 10Ω 甚至更低，但这会增加工作难度。

尽管电气设备出故障概率很低，但谁也不能保证故障能完全避免，所以必须增设接地保护。理论上，只要 TN-S 接地系统合格，确实可以确保安全。但实际情况是，故障未必会按照理论状态发生，在进行接地设计

时，还需考虑最恶劣的情况。比如，PE 线因故障断开。而且，因接地线位置多隐蔽，即便发生故障，也很难被察觉，在这种情况下，TN-S 系统就转变成 TT 接地系统，此时的设备接地极所起的保护作用就至关重要了，可以从很大程度上降低碰壳触电风险。不只 TN-S 接地系统如此，TN-C、TN-C-S 接地系统均是如此。

1.2 用于保障人身安全的接地

除了电热水器、KTV 话筒触电外，对接触其他非载流金属设备触电的事故也有过报道，譬如，接触空调外机触电致命的事故就发生过多次，触碰电热水壶、手机外壳触电身亡的事情也发生过，甚至还发生过接触漏电金属栏杆触电致命的事故……

总而言之，只要有可能与漏电设备接触的非载流金属设备均有可能带电，从而导致意想不到的触电事故。故应该参考和遵照美国国家安全规范（The National Electrical Code, NEC），并严格执行接地等安全保护措施，NEC 为最基础的电气规范，包含了最低的电气标准。下面列出 NEC 中一些有关接地的要求。

1.2.1 特殊设备

美国国家安全规范 Section 250-42(the National Electrical Code, NEC)介绍了至少 6 类最常见的不带电的金属部件，这些部件原本都不带电，但在一定情况下都会带电，都必须接地。

(1) 在地面（及地面任何可能被人员接触到的已接地的物件）上垂直 2.4m、水平 1.5m 范围内，所有的金属部件都必须接地，这样可确保相应区域可能接触到相应部件的人身安全。

(2) 任何裸露在潮湿位置和湿润气候区域的金属部件都必须接地。NEC 定义的潮湿位置包括任何一种液体饱和的位置、地面下的其他位置、混凝土板；湿润气候区域则是一些含有稳定水分的室外和地下室等位置。

(3) 接触到电气的金属部件必须接地。

(4) NEC 中第 500~517 条所包含的危险区域都必须接地。

(5) 固定在设备上的裸露的非载流金属部件在任何时候都必须接地，比如金属壳、金属盖、金属电缆管。

(6) 固定设备在运行时，如有一点的对地电位超过 150V，则任何裸露的非载流部件均必须接地。

1.2.2 特殊的固定设备

除了 Section 250-42 介绍的一般规则外，NEC 还包含了一些固定设备的裸露的非载流金属部件必须接地的规则。Sections 250-43 要求以下设备的金属部件必须接地：配电盘构架和装置、管风琴、电动机架、电动控制器的附件、电梯和起重机、车库、影视工作室、带电的标志、投影仪、远程控制开关、信号和火警电路、照明器材、电动水泵、金属水井盖。一般与上述所提及特殊设备有关的任何裸露的非载流金属部件均必须接地。

1.2.3 通过线和插头连接的设备

Section 250-45 包含了通过线和插头连接的设备的接地规定。一般至少在以下 4 种状态下，这些设备的裸露非载流金属部件可能带电，必须接地。

(1) NEC 中第 500~517 条所包含的危险区域都必须接地。

(2) 对地工作电压超过 150V 的设备须接地。正如一般的固定设备一样，仍有一些例外情况，比如发动机、电暖器的金属架以及有双重绝缘系统的设备。

(3) 所有以下民用设备必须接地：冰箱、冷冻机、空气调湿器、洗衣机、烘干机、洗碗机、厨房废物清除机、油池泵、电气养鱼池、便携式电动驱动工具、静止的固定电动驱动工具、轻工业电动驱动工具、树草修剪机、割草机、吹雪机、除湿器、便携手提灯。不过 Section 250-45 (c)

也列出了一种例外情况，允许采用双重绝缘系统的电器用具等不接地。

(4) 所有以下非民用设备必须接地：冰箱、冷冻机、空气调湿器、洗衣机、烘干机、洗碗机、电脑/资料处理设备、油池泵、电气养鱼池、便携式电动驱动工具、静止的固定电动驱动工具、轻工业电动驱动工具、树草修剪机、割草机、吹雪机、除湿器、便携手提灯、操作人员所在位置可能导电的（譬如大地、容器或者锅炉的金属表面或内部）潮湿位置和湿润气候区域的电具、潮湿或者其他导电性情况下使用的设备。

同样，对上述非民用设备也有两类例外：

1) 通过不超过 50V 的不接地的二级隔离变压器配电的手提灯等工具在潮湿或者其他导电情况下使用时可不接地。

2) 被特别标注有双重绝缘系统的便携式、静止固定、轻工业电动驱动工具，电气用具可以不接地。

由此可见，如果能遵从 NEC，那么就不易发生触电伤人事故。

1.3 发电厂、变电站接地

合格的低接地电阻值对变电站安全运行至关重要，可以快速分散故障电流，降低设备对地电位，保障人员和设备安全。变电站、发电厂电容容量极大，如发生的故障泄漏电流不能通过有效的接地快速分散，将会迅速积聚，使系统产生数千甚至数十万伏的对地电位，必然会击穿其间的设备或向人员放电，导致设备毁坏、人员伤亡的严重后果。譬如，某电厂曾突发故障，导致控制电缆和保护电缆被击穿起火，继电器被毁，发展成大面积瘫痪事故，直接经济损失高达数千万元，间接损失高达数亿元，事后调查时发现是接地装置锈蚀致系统对地电位超限之故。

发电厂、变电站对接地相当严格，一般要求接地电阻值 $R < 2000/I_g$ （实际中，对 110kV 及以上电压等级还需满足接地电阻值不大于 0.5Ω 的要求），其中 I_g 为计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值。

一般需依靠有效接地将发电厂、变电站故障电流时的对地电位限制在

2000V 以下，从而保障站内设备的安全。如果难以达到该要求，可通过技术经济比较，适当增大接地电阻，允许接地网将发电厂、变电站故障电流时的对地电位限制提高至 5000V 甚至更高，不过需经专门计算、设计出合理的措施以确保相应情况下人身和设备安全可靠。如果土壤条件过于恶劣，电阻率过高导致故障时的对地电位严重超限，那么则需减少电站荷载以满足安全要求。某著名水利枢纽工程也是这么做的，在电阻率最高的旱季，将左岸运行机组减至 11 台以下，牺牲发电量，从而将故障电流控制在 25 000A 内，保障继电器等设备安全运行。

【案例 1-1】某著名水利枢纽工程接地情况

前面已经说过，如果变电站系统设备对地电位升高不超过 2000V，就能保证现用的常规设备的安全。而完全建成后的该电站，在故障时的最大入地电流约达 33kA，接地电阻必须低至 $2000/33\ 000=0.06\ (\Omega)$ ，才能保障系统设备安全。为此，共需布置约 70km^2 接地网（电阻率按 $1000\Omega\cdot\text{m}$ 估算）。

因此，必须降低接地电阻值要求，根据 DL/T 621—1997 的规定，如接地电阻值不能降至 0.06Ω ，还可以通过技术经济比较增大接地电阻，但不得大于 5Ω 。但如将该电站的接地装置的接地电阻值放宽至 5Ω ，那么，产生 33kA 的故障电流时，其对地电位将高达 $33\ 000\times 5=165\ 000\ (\text{V})$ ，产生的高跨步电压、接触电压足以致命，而且 165kV 的电位还会击穿控制电缆、击毁继电器等站内电气设备，严重威胁站内人身和设备安全。

因此，必须适当放宽接地电阻值要求，但也不能随意放宽，否则就会导致电站的安全运行得不到保障。那么，究竟取多大的接地电阻值才算合理呢？关键还是要看控制电缆和继电器等设备安全工作时所允许系统设备的最大对地电位。

一系列的试验研究证实，电缆可承受工频电压 15kV，继电器可承受工频电压 5.5kV，故电站接地装置的允许电位升高到 5000V 应是容许的，只需将电缆的屏蔽层剥掉 1cm 就可以了。而且，5000V 的对地电位也基