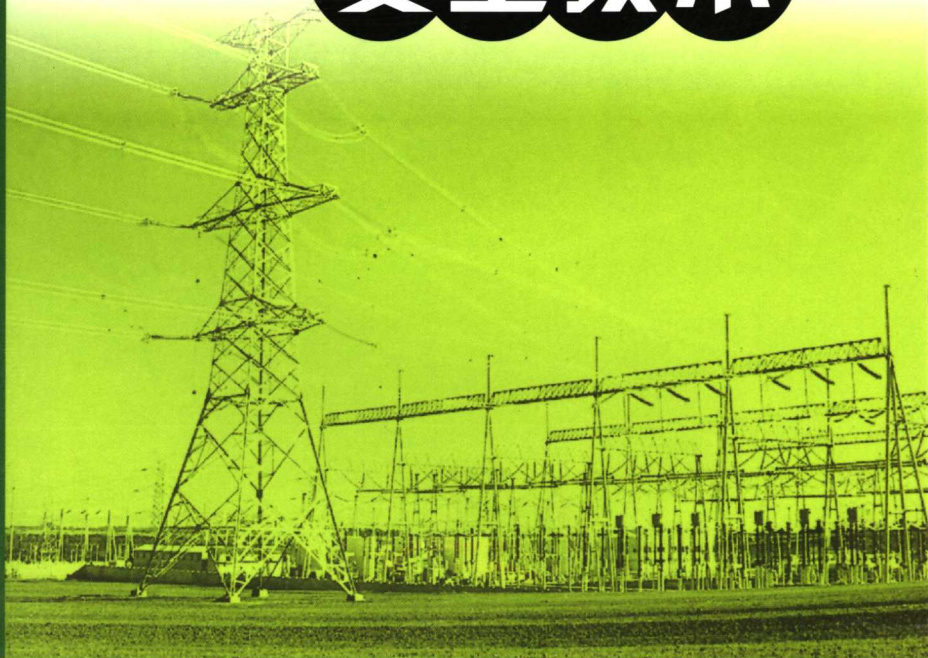


余虹云 编

500kV

变电站过电压及

安全技术



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

500kV

变电站过电压及

安全技术

余虹云 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

随着近年来我国用电需求的增长以及我国能源分布与生产力发展相互间不平衡的情况;特、超高压输电在我国很有发展前景。本书正是为了解超高压系统,尤其是500kV变电站的过电压技术及安全管理等相关知识而编写的。

全书共分八章,主要包括:超高压电场的静电效应、超高压电场的电晕效应、高压电气设备绝缘试验、防雷设备与接地装置、500kV变电站的防雷保护、500kV电网内部过电压以及电气设备的绝缘配合、变电站危险源分析及事故原因分析、变电站安全管理与预案。

本书可作为500kV变电运行人员和技术管理人员的培训用书和参考用书,也可作为相关电力工作者和电力工程类大、中专学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

500kV 变电站过电压及安全技术/余虹云编. —北京:
中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-5253-4

I. 5... II. 余... III. 变电所过电压安全技术
IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027267 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007年4月第一版 2007年4月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 8.5印张 222千字

印数 0001—3000册 定价 18.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

随着国民经济的发展,我国各大电网管理部门都在建设以500kV及以上超高压电压等级电网作为主干电网,因此,500kV变电站的运行工作在确保电网的安全、稳定、可靠地运行中起着举足轻重的作用,而提高现场运行人员的综合素质则是做好该项工作的前提。

在500kV变电站中,电气设备的绝缘与试验、过电压的形成与防护,变电站的安全与事故预防,是变电站运行和管理人员所必须掌握的基本内容和要求。因此,本书分八章着重在500kV超高压系统的高电压技术电介质及试验方面包括超高压电场的静电效应、电晕效应和电气设备的绝缘试验,500kV变电站的过电压及防护方面包括防雷设备与接地装置、防雷保护、内部过电压以及电气设备的绝缘配合,并从变电站存在的危险源分析及导致事故的原因分析等方面,介绍了变电站安全管理与安全预案等内容。

本书在编写过程中得到了许多专业人员的热情帮助和大力支持,并付出了辛勤的劳动,在此一并致以感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2007年1月

目 录

前言

第一章 超高压电场的静电效应	1
第一节 电场强度、电压及电位	1
第二节 高压电场的静电感应	5
第三节 静电感应对人体的影响及限制措施	8
第四节 500kV 变电站工频电磁场分布测量	14
第二章 超高压电场的电晕效应	19
第一节 电晕可听噪声	19
第二节 电晕腐蚀	20
第三节 电晕损失	21
第四节 电晕无线电干扰	22
第五节 500kV 变电站限制电晕效应的措施	23
第三章 高压电气设备绝缘试验	26
第一节 绝缘电阻和吸收比的测量	27
第二节 泄漏电流的测量	33
第三节 介质损失角正切值测量	37
第四节 耐压试验	41
第五节 预防性试验报告	49
第六节 预防性试验的相关要求	59
第四章 防雷设备与接地装置	67
第一节 避雷针与避雷线	67

第二节 避雷器	72
第三节 接地装置	82
第五章 500kV 变电站的防雷保护	87
第一节 500kV 变电站的直击雷防护	87
第二节 500kV 变电站雷电侵入波保护	90
第六章 500kV 电网内部过电压与电气设备	
绝缘配合	98
第一节 超高压电网的工频电压升高	99
第二节 超高压电网的合闸过电压	106
第三节 超高压电网中的谐振过电压	112
第四节 电气设备的绝缘配合	118
第七章 变电站危险源分析及事故原因分析	125
第一节 危险点概述	125
第二节 变电运行危险点分析及预控措施	128
第三节 变电站事故原因分析	150
第四节 变电站事故案例	157
第八章 变电站安全预案与管理	183
第一节 国家处置电网大面积停电事件应急预案	183
第二节 省电网重特大事故应急预案	193
第三节 防止 500kV 变电站全停事故措施 及处理预案	203
第四节 500kV 系统安全检查内容	258
参考文献	263

超高压电场的静电效应

超高压（330~750kV）电场具有较强的静电效应，本章从电场强度、电压及电位等基本概念出发，对高压电场的静电感应、静电感应对人体的影响及限制措施等方面进行了阐述，并以某 500kV 变电站工频电磁场分布为例进行了实测分析。

第一节 电场强度、电压及电位

带有一定电量的导体叫做带电体。在带电体的周围空间，存在着一种特殊的物质叫做电场。电场的存在，可用一个试验点电荷在电场中的受力现象得到证实。用库仑定律可算出电荷受力的大小，并能判断其受力方向。带电体和试验电荷并没有直接接触，却有力的作用，是因为带电体周围存在着电场。现对电场的性质及衡量电场的量，分述如下。

一、电场强度

用一个试验点电荷，放在电场空间不同地点，它受到的电场力的大小和方向是不相同的，所以要引入“电场强度”来描述、衡量空间各点不同的电场。

电场强度是向量，既有大小又有方向，它的定义为：电场中某一点 a 的电场强度是一个向量，其大小等于试验正电荷 q_0 在 a 点所受的电场力 F_a 与 q_0 的比值，其方向与试验正电荷 q_0 在该处所受电场力的方向一致，即

$$\vec{E}_a = \frac{\vec{F}_a}{q_0}$$

电场强度的单位为伏每米 (V/m) 或牛每库 (N/C)。

a 点电场强度 E_a 的大小与试验电荷 q_0 的多少无关, 它只与在 a 点产生电场的带电体的电量多少、距 a 点的距离以及空间介质的种类有关。

电场强度是描述空间电场性质的一个重要向量, 它具有以下两个基本特性:

(1) 电场对于处在场中的带电体有力的作用, 这种力叫做电场力。电场力的大小与该点的电场强度大小有关, 与带电体携带的电荷量多少有关。

(2) 电场中有能量分布。放一个试验点电荷在电场中, 它会受到电场力的作用, 并在电场力的方向发生位移。也就是说, 电场对试验电荷做功。功和能量是可以互相转换的, 从而证实电场中到处分布着能量。

二、电力线

电力线是表示电场存在的一种方法, 为了使空间电场分布状况形象化, 人为地在电荷周围画出几何曲线族, 用它的形状和疏密程度来表示电场的性质, 这些曲线叫做电力线。画电力线时应遵循下述规定:

(1) 电力线上每一点的切线方向, 就是该点电场强度的方向。规定电力线起源于带正电荷或高电位的极板, 中止于带负电荷或低电位的极板。

(2) 电力线的疏密程度代表该区域电场强度的强弱。

(3) 各条电力线互不相交, 并且垂直于带电导体表面。

不同形状带电导体周围空间或电极之间的电场分布如图 1-1 ~ 图 1-4 所示, 其中 $E_a > E_b$ 。

研究高压带电体附近空间各点电场强度的数量, 有着重要的意义, 例如当电极间的电场强度超过某临界值时, 会产生气体放电, 甚至导致电极间的介质击穿。

三、电压和电位

前面已讲述了用电场强度 (向量) 来描述电场的性质, 现在

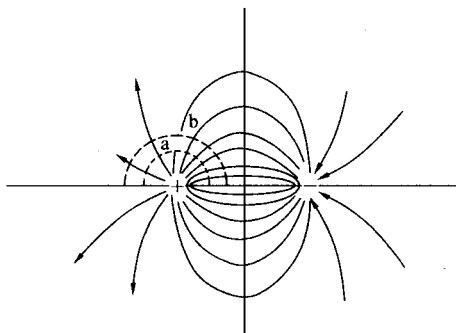


图 1-1 带等量异号电荷两小球间的电场

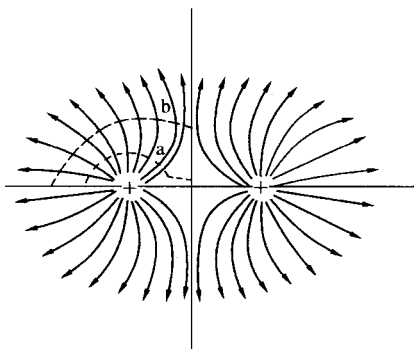


图 1-2 带等量同号电荷两小球间的电场

引入另一个物理量“电压”，来进一步描述、衡量电场。

1. 电压

电压的定义：在电场中，如果由电场力把正电荷 q 从 a 点移动到 b 点所做的功为 A_{ab} ，则电场中 a 点至 b 点间的电压为 A_{ab} 与 q 之比，即电场力移动单位正电荷所做的功，用符号 U_{ab} 表示，故

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q}$$

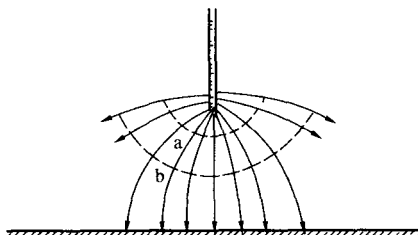


图 1-3 棒板间的电场

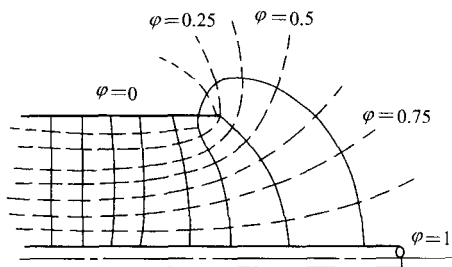


图 1-4 电容型套管极板边缘电场分布

——电力线；--- 等位线

电压的单位为 V（伏特），它可解释为当电场力移动 1C（库仑）的电量，在两点间做的功为 1J（焦耳）时，那么这两点间的电压为 1V。

电场中 a、b 两点间电压 U_{ab} 的大小只与 a、b 两点的位置有关，与 q 移动过程中在电场中行径的路径无关。a、b 两点位置确定后， U_{ab} 只有一个数值。

电压是标量，只有数量，没有方向。

对电压数值规定如下：电压必须指出它的起点与终点，其数值的含义为电压降落值，电压是只有正负之分的代数数量。

2. 电位

为了实用起见，描述、衡量电场中某一个点的电位能，还要引入电位的概念。首先选取电场中某一点作为参考点，参考点的

电位为零。电位就是某点与参考点之间的电压。某些场合不指出参考点，应理解为大地即参考点或无穷远处为参考点，否则必须加以特殊说明。有了电位的概念，就可以简单方便地用数量的大小，来描述电场中任一点的电位。

某电场中两点间的电压值是固定不变的，但各点的电位值却随参考点选取的地点不同而发生变化。实际应用中都是以分析问题简单方便为根据来选取参考点，否则，参考点选择不当会人为地造成麻烦。

电场中电位相等的各点，叫做等位点。连接各等位点的线，叫做等位线。它与电力线构成正交曲线族，即在它们相交的各点，都是相互垂直的，如图 1-1~图 1-4 中的虚线所示。

此外，不能简单地用电路的观点对待高压电场中的问题，例如在高压电场中，未用导线与电源、极板相连的周围空间各点，都有电位存在；两点之间也有电压存在，而且数值可能很高，它们不能再被忽略。

四、工频高压带电体附近产生的电场和电位

前面讲述了静电场的一般概念，以及静电点电荷在其四周产生的电场，并引出了电场强度、电压、电位的概念。这些有关静电场的知识，可以直接在工频交流高压带电体的问题中使用。工频交流带电体在周围空间产生交变电场，但在任一瞬间，都可以近似地作为静电场进行计算。通常已知条件是工频交流带电体对地电位的有效值，或电极间施加电压的有效值，而不是带静电荷 q 的数量。

第二节 高压电场的静电感应

在高压带电体附近空间，放入一个孤立（对地绝缘）的金属体，它会产生感应带电的现象。这是因为金属体受到该点电场强度的作用，在其表面会呈现正负电荷；并对地具有一定的电位值，这种现象叫做静电感应。静电感应使金属体出现电荷的数量

及它对地的电位值，与所在处的电场强度大小有关，与它自身的尺寸有关。

通常以感应电压、感应电流、地面未畸变场强等物理量来描述静电感应现象，特别是后者，它是表征变电站静电感应水平的最基本的参数。

一、感应电压

如图 1-5 所示，把一个孤立的金属球 2，放在对地电位为 U_1 的超高压架空线路 1 下，虽然 1 对地有相当的高度，但 1 与 2 仍有较小的电容 C_{12} 存在，2 与地面有较大的电容值 C_{22} ，由于电容耦合的作用，金属球出现了感应电压 U_2

$$U_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} U_1$$

二、感应电流

当人手接触金属球时，由于标准人体的电阻一般为 $1000 \sim 1500 \Omega$ 左右，它与几百兆欧的导线和金属球间容抗值 X_{12} 相比小得多，可以忽略不计。此时相当于将金属球直接接地，因此带电导体通过容抗 X_{12} 对地流过电流。在人手刚接触金属球的瞬间，先有一个暂态电流，它是由原来积蓄在金属球上的电荷（对地电容 C_{22} 的充电电荷）通过人体被释放而形成的瞬间电流。达到稳定后，还有一个工频稳态电流流过人体，它是由于带电导体对地电容形成的电容电流。一般将在高电场中人体接触被感应物体时流过人

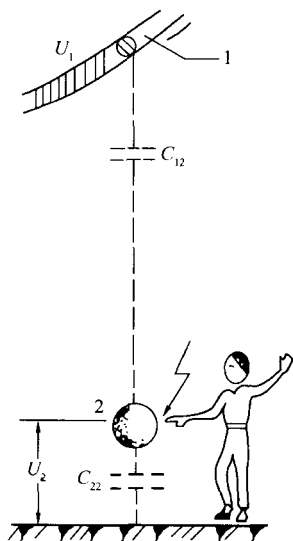


图 1-5 孤立金属球在电场中感应带电

体的稳态电流称为感应电流。感应电流的大小标志着稳态电击的严重程度。

三、地面未畸变场强

500kV 变电站具有许多错综复杂的带电体，在它们周围空间形成了一个比较复杂的高电场。如果在这个高电场中放入被感应物体，高电场便会发生畸变，电场的畸变程度与被感应物体的几何形状、位置等因素有关。因此，只有将被感应物体除去才能真实地反映原来高电场的静电感应水平。由于变电站内存在很多带电导线以及构架等接地体的屏蔽作用，变电站内电场强度沿高度在离地面 2m 范围内的分布变得不均匀且有较大的水平分量。考虑到变电站运行人员正常巡视时人体活动的一般高度为 1.5m，同时也为了避开地面杂草以及地面凹凸不平引起的电场畸变的影响，变电站的静电感应水平一般采用变电站内没有感应物体时，地面上 1.5m 高的空间未畸变电场强度来表征。采用未畸变空间电场强度来表征变电站静电感应水平，还因为未畸变空间电场强度不受大气环境条件的影响，能够真实地反应变电站的静电感应水平。被感应物体的感应电压、电流和未畸变场强成正比。此外，未畸变电场强度比较容易进行实测和模拟试验。综上所述，地面未畸变电场强度是反应变电站静电感应水平的最基本参数。

由此可知，当人体靠近带电设备时，产生的感应电流大小与人体对地绝缘情况有关；人体的感应电压 U 与人体对地绝缘状态有关，鞋的绝缘越好， U 越高。当人体与接地体直接接触，在暂态电击电流的作用下，人即有针刺、麻电的不适感觉。在特殊情况下（如带电作业、检修），当人体接近高压带电体时，人体处于高场强区，同样也会处于带电状态，人体发须的根部及耳、鼻尖突出的局部会有风吹、刺疼的感觉，如穿着特制的带电作业服及鞋帽，则可以减轻此种感觉。人体因静电感应对地具有高电位，如果此时人体突然与接地零电位的金属物接触，同样会发生火花放电，产生对人体的暂态电击，可能导致一时失手或丧失身体平衡，发生二次高空坠落的不幸事故。

综上所述，超高压带电体附近，因静电感应使孤立导体带电，并具有一定危险电位的现象，对于从事检修及试验人员的安

全具有重大意义；另外还会对处在其下方的设备，在测试中产生强烈的干扰电流，带来一系列的影响。为了防止或减弱静电感应带来的后果，应采取相应的措施。

第三节 静电感应对人体的影响及限制措施

静电场的感应现象对人身的影响包括高电场对人体生理的影响和感应电流对人体影响两大类。

一、高电场对人体生理的影响

高电场对人体生理的影响必须通过对大量的高电场作业人员进行长期的全面观察，进行细致的医学、生理学检查，经过分析对比研究之后才能得出比较正确的结论。对于这一问题长期以来看法不一致，经过许多专家、学者的大量调查研究，目前国际上几种不同观点基本趋向一致。认为目前所采用的电场强度对人体没有明显的生理影响，即使由于电场的作用使人体的生理学、医学指标有一些变化，那也是微弱的、暂时的、可恢复的，并没有超过生理学的允许范围。当然现在国内外对高电场影响人身的问题仍在不断深入研究中。

二、感应电流对人体的影响

由前述可知，当人体接触位于高电场中的被感应物体时，人体内将流过暂态感应电流和稳态感应电流。下面分别讨论这两种电流的影响。

1. 暂态感应电流的影响

暂态感应电流是由于被感应物体本身积蓄的电荷对人体放电的结果，它对于人体的影响可以用能量来表示。研究结果表明，暂态电击造成人体死亡所需要的能量约为 30J。在这样大的能量之下，会引起人体心脏纤维性颤动，使人死亡。但是在 500kV 变电站中通常很难有积蓄 30J 能量的被感应物体，例如，变电站特车辆的的对地电容约 3000pF，如果在其上感应电压达到 15kV 时，它所积蓄的能量仅有 0.3375J，比造成人体死亡的 30J 能量

小很多。中国电力科学研究院采用雨伞进行暂态感应电压试验，当感应电压为 8.6kV ，伞的对地电容为 47pF 时，相应的能量为 1.74mJ ，这时人接触雨伞有严重刺疼感觉。日本的试验是将人打着伞并置于地面电场强度为 3kV/m 以上的电场中，当人接触雨伞时产生刺疼感觉，估计其相应的能量约为 0.8mJ 以上。因此，暂态感应电流对人体的影响主要是感觉反应。被感应物体积蓄的能量从 0.5mJ 开始，一直到接近 30mJ 为止，都会使人产生一定的感觉，感觉反应范围很广。综上所述，由于暂态感应电流作用时间极短，而且被感应物体不可能积蓄那样大的能量，所以它对人身没有危险，但是，高电场作用下暂态感应电流对人体的影响都比较大，主要表现在以下两个方面。

(1) 在高电场中如果被感应物体的感应电压数值比较高时，人体并没有接触被感应物体，而与它还有一定距离时，被感应物体会经过小空气间隙对人体放电。

(2) 人体站立在高电场中不接触任何带电物体和被感应物体，但是会出现毛发竖立、手臂和衣服之间有刺疼的感觉。人的头发对帽子、脚部对鞋子都会产生放电现象。这时流过人体的工频电流并不大，只有几十至几百微安，这些放电不会引起直接的生理危害。但是如果在高空作业，尤其是思想准备不足时，作业人员遇到这些小间隙放电引起的暂态电击，有可能会从高空坠落发生事故。另外，高电场下的放电现象虽然不很强烈，但也会使人感到烦恼，重复多次放电甚至使人无法正常工作。加拿大魁北克水电研究院也指出：感应电流虽然很微弱而不产生直接危害，但是处在这种不舒服条件下的变电站工作人员是无法工作的，电击的疼痛和多次重复会形成“应激反应综合症”。以上这种现象在低电场中是不会出现的。

2. 稳态感应电流的影响

稳态感应电流是被感应物体的电容电流，它是 50Hz 的工频电流。低压工频电流对人体的影响，人们很早就开始研究，并积累了很多统计数据，归纳起来有以下三点：第一，工频电流为

1mA 时, 人体有感觉, 通常称为感觉电流; 第二, 工频电流为 5mA 及以下时, 人体可以摆脱带电体, 通常称为摆脱电流; 第三, 工频电流为 25mA 时, 人体有剧烈疼痛的感觉, 肌肉收缩, 呼吸困难, 通常称为危险电流。

经过反复试验后发现, 在高电场中稳态感应电流对人体的影响和低电场差不多, 同时发现电流密度对人体也有影响, 例如, 某电力科学研究院曾做过电流密度影响试验, 在人的脚踝部位绕一圈细铜丝, 人处在高电场中, 此时即使流过人体的感应电流的数值很小, 还不到 0.2mA, 远小于上述低压工频稳态感应电流 1mA, 但是由于相应的电流密度比较大, 超过了 $0.3\text{mA}/\text{mm}^2$, 人体产生了强烈的刺疼感觉, 试验结果见表 1-1。在同样条件下如果人体用手握住位于高电场下机构箱的门把手时, 由于接触面积增大, 电流密度明显减少, 则感应电流达到 0.9mA 时, 人体才有明显的刺痛感觉, 感应电流的数值比表 1-1 中的试验值 0.18mA 大了四倍多。由此可见, 高电场中感应电流密度是影响人体感觉的因素之一。

表 1-1 稳态感应电流对人体的影响

流过人体的感应电流 (mA)	感应电流密度 (mA/mm^2)	感觉程度
0.07	0.127	开始感觉
0.10	0.182	明显刺激
0.14	0.254	刺 痛
0.18	0.323	强烈刺痛

综上所述, 高电场下暂态和稳态感应电流对人体的影响比低压工频对人体的影响大、程度较严重。因此, 应该将静电感应限制在一定的范围之内, 以防止引起 500kV 变电站的作业人员发生二次事故以及产生“应激反应综合症”等问题的出现。

三、静电感应的允许标准

前面已经指出未畸变地面电场强度是描述高电场静电感应的基本参数, 因此, 静电感应允许标准可以用它来表示。目前国际

上对 500kV 变电站静电感应允许值尚无统一的标准和规定，一般认为静电感应允许标准采用电场强度为 10kV/m 是合适的。因此，我国 DL/T 5218—2005《220kV~500kV 变电站设计技术规程》10.2 中规定：

(1) 变电站及进出线的电磁辐射对环境的影响应符合 GB 8702《电磁辐射防护规定》、GB 9175《环境电磁波卫生标准》和 GB 15707《高压交流架空送电线无线电干扰限值》等的规定，以及现行的 HJ/T 24—1998《500kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》要求。

(2) 在变电站的设计中应选用电磁辐射水平低的设备。设备及配件的加工应精良，外形和尺寸合理，避免出现高电位梯度点。

(3) 变电站进出线方向应选择避开居民密集区，主变压器及高压配电装置宜布置在远离居民侧。变电站附近高压危险区域设置相应警告。

HJ/T 24—1998 中 2.2.4.2 条规定：关于超高压送变电设施的工频电场、磁场强度限值目前尚无国家标准。为便于评价，根据我国有关单位的研究成果、送线路设计规定和参考各国限值，推荐暂以 4kV/m 作为居民区工频电场评价标准，推荐应用国际辐射保护协会关于对公众全天辐射时的工频限值 0.1mT 作为磁感应强度的评价标准。待相应国家标准发布后，以其规定限值为准。

通过对我国 220~500kV 变电站大量的实测及模拟试验工作，可以得出这样的结论：对于 220kV 变电站，其空间电场强度一般不超过 5kV/m ，因此，认为静电感应问题并不突出；对于 500kV 变电站，各电气设备周围的最大空间电场强度大致为 $3.4\sim 13\text{kV/m}$ 。电场影响的标准，大多数国家要求控制在 10kV/m 以下，对于变电站开关场，个别地点也不应超过 15kV/m 。表 1-2 是 330~500kV 变电站设备旁离地面 1.5m 高处最大场强分布规律。