

易 辉 编著

带电作业技术标准体系 及标准解读



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

带电作业技术标准体系 及标准解读

易 辉 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从带电作业技术所涉及的基础理论为出发点阐述了输电线路带电作业(包括交、直流输电线路)、配电线路带电作业和变电带电作业的主要内容和各自特点。对带电作业标准体系的建立和带电作业 IEC 标准、我国带电作业国家标准、电力行业标准的分类、特点和区别等进行了详细介绍。同时对我国带电作业主要标准的编制原则和背景材料进行了介绍,并附有相关标准原文。

全书共分三章:带电作业技术的主要内容、带电作业标准体系、带电作业相关标准的编制原则及内容解读。文后有 3 个附录:带电作业 IEC 标准名称及标准编号、全国带电作业标准化技术委员会标准化工作纪事、我国专业人员参加国际带电作业标准化活动纪事。

本书除可供从事带电作业管理工作与带电作业实际操作的人员参考外,还可供电力生产、设计及科研工作人员和高等院校相关专业师生进行参考。

图书在版编目(CIP)数据

带电作业技术标准体系及标准解读/易辉编著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8534 - 1

I. 带… II. 易… III. 带电作业 - 标准 - 中国 IV. TM72 - 65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 027482 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

*

2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 325 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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

PREFACE

我国的带电作业技术经过 50 余年的发展,已经日臻完善。带电作业技术已经成为保障电网安全、经济、可靠运行和向客户不间断供电的一种行之有效的重要手段。随着我国电网由高压、超高压向特高压迈进;由交流输电向多元化直流输电的延伸和发展,尤其是我国 1000kV 交流特高压和 $\pm 800\text{kV}$ 直流特高压电网的建设,我国的带电作业将迎来一个新的发展和再创辉煌的时期。

带电作业的产生源于生产实践的需要,但带电作业的发展却离不开理论的指导和科学的实践。世界各国带电作业的创建和发展历史无一例外地证实了理论和实践相结合的重要性。

带电作业技术需要研究高压静电场、直流离子流电场、电磁感应、静电屏蔽以及人体在电场、磁场和电流的影响下的生理反应,以及各类阈值,同时对各种安全作业方式和作业人员的防护措施要进行重点研究。所有带电作业科学研究成果和带电作业生产实践经验必须经过过去粗存精、去伪存真,不断总结提高的过程,才能编制成相应的标准,以便更好地指导带电作业科研和生产实践。

本书的编撰目的是为了广大电力工作者了解带电作业技术、带电作业历史和带电作业标准化。本书在力图对带电作业基础理论进行阐述的同时,对输电线路、配电线路和变电带电作业的主要内容和各自特点进行介绍,尤其是对带电作业标准体系的建立和带电作业 IEC 标准、我国带电作业国家标准、电力行业标准的分类、特点和区别等进行详细介绍。本书的许多内容是编者所主持和参入的科研项目的科研成果,以及编者所主持和参入的带电作业标准,起草和编制过程中的心得和体会。

国网电力科学研究院张丽华高级工程师长期从事带电作业标准化技术委员会秘书处的秘书工作,本书所引用的标准原文由她进行了仔细校对,并撰写了附录 2 全国带电作业标准化技术委员会标准化工作纪事和附录 3 我国专业人员参加国际带电作业标准化活动纪事。这里,对张丽华高工的辛勤工作,表示诚挚的感谢。本书还得到国网电力科学研究院胡毅教授级高级工程师的许多帮助,也在此一并致谢。

由于本书编写时间有限,难免存有不妥和谬误之处,敬请读者不吝赐教。

编 者

2009 年 1 月

目 录

CONTENTS

前言

▶ 第一章 带电作业技术的主要内容	1
第一节 与带电作业技术相关的基础理论	1
第二节 输电线路带电作业技术	23
第三节 配电线路带电作业技术	32
第四节 变电站带电作业技术	37
▶ 第二章 带电作业标准体系	41
第一节 带电作业国家标准、电力行业标准所涉及的领域	41
第二节 带电作业 IEC 标准所涉及的领域	42
▶ 第三章 带电作业相关标准的编制原则及内容解读	46
第一节 术语及定义	46
第二节 方法与要求	72
第三节 安全及注意事项	116
第四节 试验项目及周期	192
附录 1 带电作业 IEC 标准名称及标准编号	229
附录 2 全国带电作业标准化技术委员会标准化工作纪事	232
附录 3 我国专业人员参加国际带电作业标准化活动纪事	235
参考文献	237

第一章

带电作业技术的主要内容

IEC 60050—651: 1999《电工术语 带电作业》和 GB/T 2900.55—2002《电工术语 带电作业》中将“带电作业”这个术语定义为“工作人员接触带电部分的作业或工作人员用操作工具、设备或装置在带电作业区域的作业”。《中国电力百科全书》中对“输电线路带电作业”这一名词解释时,使用了“为必须不间断供电而在带电的输电线路进行的维修工作”这样的字句。换言之,所谓“带电作业”,具有两层意思,其一,电气设备包括输电线路、配电线路和变电站的电气设备,必须是带电而不是停电的状态;其二,是对带电的电气设备进行检修、安装、调试、改造及测量工作的通称。

带电作业是在电气设备带电的状态下进行的检修、安装、调试、改造及测量工作,它有别于一般意义下,即停电状态下的检修、安装、调试、改造及测量工作。其原因是电气设备处于带电的状态下,作业人员必须在带电作业区域内进行工作,而带电的电气设备所产生的电场、磁场以及电流有可能会对作业人员的身体产生严重影响。因此,必须对进入带电作业区域内进行工作的人员采取有效的防护措施,才能确保在带电作业区域内作业的工作人员的安全。这一点正是带电作业与一般作业的最大区别。

由于带电作业人员经过了专门训练,使用特殊工具,按照科学的程序作业,保证了人体与带电体及接地体之间不形成危及人身安全的电气回路,同时,对作业人员采取了对强电场的防护措施,为作业人员提供了无害和良好的工作环境。因此,带电作业人员可以身心愉快地在带电的电气设备上进行各种检修、安装、调试、改造及测量工作。

在开展带电作业的初期,人们对带电作业所涉及的理论问题并不十分了解,由于理论与实际的脱节,引发了一些带电作业的事故。现在回过头来看,当时所犯的错误十分低级。带电作业经过几十年的实践和发展以及对带电作业理论的深入研究,获得了许多研究成果以及适用的新方法,使得带电作业逐渐形成了一门新的综合性的应用技术。

第一节 与带电作业技术相关的基础理论

一、带电作业发展简史

目前,世界上已有 80 多个国家开展了带电作业的研究与应用,其中美国、中国、苏联、日本、加拿大、法国、英国、德国、瑞士、比利时、意大利及澳大利亚等 40 多个国家已广泛应用带电作业技术。

带电作业技术的发展,首先是从配电线路上开始,然后发展到输电线路,再向变电站延伸的。开展带电作业的电压等级也是由低到高,先在配电线路,然后到高压输电线路,再发展到超高压输电线路,以致到特高压输电线路;由交流到直流,逐渐发展并成熟起来的。

1. 美国的带电作业

世界上最早开展带电作业的国家是美国。早在1923年,美国人就开始在34kV配电线路上探索进行带电作业。美国人当时使用的是木质操作棒,采用地电位方法进行作业。干燥的木质棒,由于其绝缘性能良好,完全能够耐受相对地电压,尽管当时制造的工具显得粗糙且笨重,但毕竟开创了带电作业的先河。之后,美国人在一段时间内的带电作业,仅在22kV和34kV配电线路上进行。直到1930年,美国才出现了66kV输电线路上的新项目。随着新型绝缘材料,尤其是环氧玻璃纤维绝缘材料的问世,20世纪50年代末,美国在带电作业工具中开始采用环氧玻璃纤维绝缘材料制成的带电作业工具,并陆续开始在345、500kV及765kV超高压线路上进行带电作业,这期间一直采用地电位作业的方法。在1960年,美国首先进行试验研究并实现了“等电位”作业的方法,但等电位作业的方法在长达十几年的时间里一直处于试验研究阶段,直到1978年,等电位作业的方法才在美国全国范围内推开。目前,美国已经在765kV及以下各个电压等级的线路上广泛开展带电作业,并进行了1000kV特高压人体接触带电体的试验。

2. 日本的带电作业

日本开展带电作业是在20世纪40年代初期,采用引进美国带电作业技术的方式,然后消化吸收,再创造自己的特点。初期日本的带电作业工具和作业项目,几乎与美国一模一样。1962年,日本开始在220kV输电线路开展带电作业,到1972年,已经能在500kV超高压输电线路自由进行带电作业了。日本在配电线路开展的带电作业最具特色,他们开发的配电带电作业工具不仅门类繁多,而且系列和规格齐全,尤其是防护用具和遮蔽用具,适用于各个配电电压等级。日本的带电水冲洗装置和水冲洗方法在世界上居于先进水平。日本的大多数变电站都安装有固定水冲洗装置,甚至于500kV变电站都装有固定水冲洗装置,而清扫输电线路绝缘子串的清洗工具有40余种,其中仅清扫500kV长串耐张绝缘子串的自动清洗机都有数种之多。

3. 苏联的带电作业

苏联于20世纪50年代初期才开展带电作业的试验研究。1955年前后,开始在35~110kV木杆线路上更换直线木杆和耐张杆木横担。1970年前后,苏联成功研究了采用绝缘水平梯进入高电位的等电位作业方法,应用在220kV及以下的线路上。之后十余年,苏联的带电作业发展缓慢,直到苏联成功建设了1150kV特高压输电线路,才将带电作业逐渐推广到330、500、750kV超高压输电线路和1150kV特高压输电线路。苏联是世界上唯一开展过特高压输电线路带电作业的国家。

4. 中国的带电作业

中国的带电作业早在1952年就开始进行了尝试,直到1954年在东北鞍山电业局研制出了第一套3.3~6.6kV带电作业工具,才标志着中国带电作业的正式开展。根据中国带电作业史料记载,中国的带电作业创始日确定为1954年5月12日。与美国的情况类似,中国的带电作业也是开始于3.3kV配电线路。初始的工具采用类似桦木的木棒来制作,尽管显得

十分笨重粗糙，但却成功地进行了 3.3kV 配电线路的地电位带电作业。1957 年 10 月，中国设计了第一套 220kV 高压输电线路带电作业工具，并成功应用于 220kV 高压输电线路的带电作业。中国的第一次 220kV 等电位带电作业试验，于 1958 年 7 月在辽宁省沈阳市举行，试验很顺利。这次等电位带电作业试验的成功，开创了中国带电作业的新篇章。

中国的 330, 500kV 超高压输电线路的带电作业分别于 20 世纪 70 年代和 80 年代先后开展。目前，500kV 超高压紧凑型输电线路、750kV 超高压输电线路的带电作业试验研究已经完成，具备了在线路上进行实际操作的工具、进入高电位方式、防护措施和安全措施的各项准备工作的基本条件。中国的 1000kV 特高压输电线路正在建设，但 1000kV 特高压输电线路的带电作业试验研究工作已经基本完成，待 1000kV 特高压输电线路建成投产后，开展带电作业则指日可待。

二、高压电场

为什么带电作业技术要研究高压电场呢？前已叙及，带电作业时作业人员必须在带电作业区域内进行工作。由于带电体的存在，其周围有电场产生，而电场的特性、强弱、变化等会对作业人员的身体产生严重影响。

1. 电场的基本特性

我们知道，自然界存在着正、负两种性质的电荷。电荷的周围存在着一种特殊形态的物质，我们称之为电场。相对于观察者为静止的，且其电量不随时间而变化的电场为静电场。例如在直流电压下两电极之间的电场就是静电场。在工频电压下，两电极上的电量将随时间变化，因而两极性之间的电场也随时间而变化。但由于其变化的速度相对于电子运动的速度而言是相对缓慢的，并且电极间的距离也远小于相应的电磁波波长。因此对于任何一个瞬间的工频电场可以近似地认为是静电场。

将一个静止电荷引入到电场中，该电荷就会受到电场力的作用。电场的强弱常用电场强度（简称场强）来描述，电场强度是电荷在电场中所受到的作用力与该电荷所具有的电量之比。电场强度是一个矢量，它具有方向性。

尽管人的眼睛不能直接观察到电场，但我们可以通过实验来得到电场的图示。比如说，用两根较长的平行导线，穿过一块绝缘板，两导线的首端加直流电压，末端开路，带电导线周围就形成一个静电场。在水平放置的绝缘板上撒一层薄薄的云母粉，并轻轻地敲击绝缘板。由于介质极化的缘故，云母粉在电场力的作用下沿着电力线顺序排列，可以形成类似于图 1-1 的图形。图 1-1 (a) 是同性电荷的电场图形，图 1-1 (b) 是异性电荷的电场图形。

从图 1-1 中可以看出，在任一电场中，电力线上任何一点，其切线的方向与该点电场强度方向是一致的，因此电力线从正极出发，到负极终止。电力线垂直于电极的表面，任何两条电力线都不会相交。而电力线的疏密程度就表示了电场的强弱。

2. 均匀电场与非均匀电场

作业人员在带电作业过程中，构成了各种各样的电极结构。其中主要的电极结构有：导线—人与构架、导线—人与横担、导线与人—构架、导线与人—横担、导线与人—导线等。由于带电作业的现场环境和带电设备布局的不同、带电作业工具和作业方式的多样性、人员在作业过程中与带电体的相对位置处于不断变化之中等因素，使带电作业中遇到的高压电场

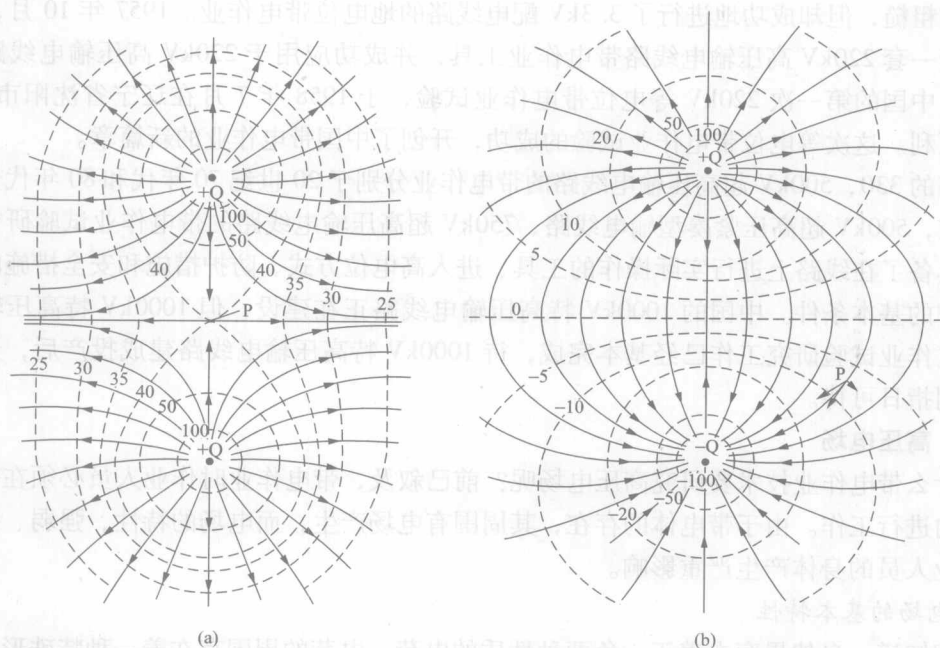


图 1-1 电荷之间的电场分布图

(a) 同性电荷的电场; (b) 异性电荷的电场

变化多端,这就需要了解带电作业的各种工况中电场的变化和特征。

按电场的均匀程度可将静电场分为均匀电场、稍不均匀电场和极不均匀电场三类。

在均匀电场中,各点的场强大小与方向都完全相同。例如,一对平行平板电极,在极间距离比电极尺寸小得多的情况下,电极之间的电场就是均匀电场(电极边缘部分除外)。均匀电场中各点的电场强度 E 为

$$E = U/d \quad (1-1)$$

式中 U ——施加在两电极间的电压, kV;

d ——平板电极间的距离, m。

在不均匀电场中,各点场强的大小或方向是不同的。根据电场分布的对称性,不均匀电场又可分为对称型分布和不对称型分布两类。在极不均匀电场中,一般以[棒—板]电极作为典型的不对称分布电场,以[棒—棒]电极作为典型的对称分布电场。

由于不均匀电场中各点场强随电极形状与所在位置而变化,所以通常采用平均场强 E_{av} 和电场不均匀系数 f 予以描述。电场不均匀系数 f 是最大场强与平均场强的比值,即

$$f = E_{\max}/E_{av} \quad (1-2)$$

稍不均匀电场与极不均匀电场之间没有十分明显的划分,对于空气介质通常以 $f=2$ 为分界线。当 $f<2$ 时,可以认为是稍不均匀电场。当 $f>2$ 时,逐渐向极不均匀电场过渡。当 $f>4$ 时,则认为是极不均匀电场。

电场的不均匀程度与电极形状和极间距离有关。在相同电极形状的条件下,当极间距离增大时,电场的不均匀程度将随之增加,例如两个金属圆球间的电场。当极间的距离相对球

的直径而言较小时,是稍不均匀电场。但当极间距离增大时,电场的不均匀程度逐渐增大,最后成为极不均匀电场。

对于空气介质,判断电场的不均匀程度可由间隙击穿前在高压电极周围是否发生电晕为依据。击穿前没有电晕现象为稍不均匀电场,击穿前发生电晕现象则为极不均匀电场。

带电作业人员在输电线路或变电站进行带电作业,如前面所列举的各种各样的电极结构,实际上都是处于非均匀电场,即稍不均匀电场和极不均匀电场之中。因此研究高压电场的基本特性和变化,是对位于不同工况工作的带电作业人员进行电场防护研究工作的需要。

3. 电场的畸变

自导线至地面的空间电场分布是极不均匀的。图 1-2 所示为单根导线平行地面架设的最理想状态按理论计算出的电位分布情况。由于电场强度对地高度间存在指数函数关系,因此在靠近导线附近 3%~9% 的区域内是高电位区,其相应的场强分布规律是相同的,见图 1-3。例如,距导线 1.5m 处场强为 12kV/cm (当 $u=127\text{kV}$ 时),距导线 0.2m 处场强却高达 84kV/cm,地面上 1.5m 处场强只有 3.4kV/m。

作业人员未进入带电作业区域,即场强分布区域,其电力线的分布如图 1-2 所示,电力线是均匀的。而一旦人体进入场强分布区域,由于人体(人体是导体)占据了空间位置,操作人员身体的介入,使得电场发生了畸变。

(1) 人在地面上的电场畸变。图 1-3 所示为人体位于地面情况下体表场强及周围电位分布图。该图形是用静电场中作图法的基本法则,按一定比例绘制而成的。表明人体进入图 1-3 中的外界电场后的电场畸变状态。一部分电力线射向人体上,随人体表面稍远的地方,电力线也会弯曲一些,但最终还是射向地面。电力线的变化,反映到等位线上,也相应地变形,在人身上方,电位线密度增加很多。电位线密度增加就意味着场强增高。如图 1-3 所示,导线距地面 10m 高,原来人体未进入前 1.8m 高度处的场强为 $E_{1.8}=3.54\text{kV/m}$,人体进入后,头顶的场强可达 63~77kV/m。头顶对整个身体而言是突出的尖端。落在头顶的电力线多,密度大,场强会变高。所以,凡人体沿电场纵向突出部位的体表场强一定最高,而接触地面的部位体表场强最低。

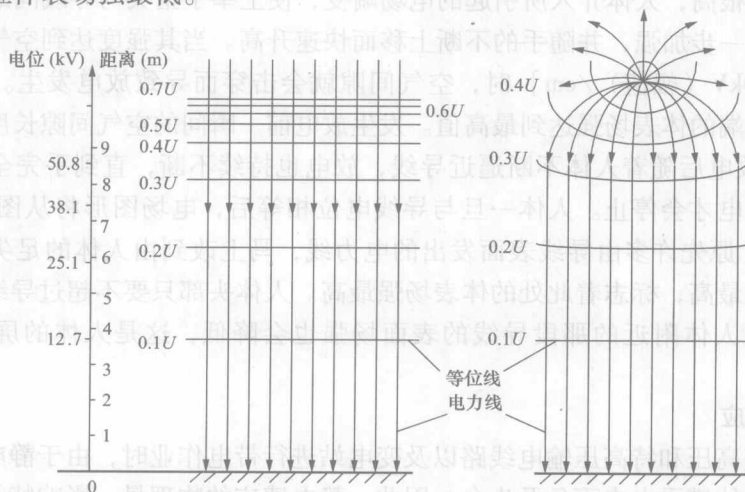


图 1-2 带电导线的电力线和等位线图

(2) 人在导线与地面间的电场畸变。图 1-4 所示为作业人员在进入等电位，人体向带电体运动过程中，人体处于导线与地面之间时的电位分布图。此时，人体上部接受来自导线的电力线，而下部脚跟等末端却向地面发出电力线。等位线发生两种弯曲，头顶向上凸出，脚跟向下凸出。其电力线的密度，头顶和脚跟较大，其他部位也有少量电力线射向人体或发出，但密度很低。所以，人体位于电场空间，沿着电场纵向的人体凸出部位，其体表场强一定较高，其他部位体表场强则不会太高。

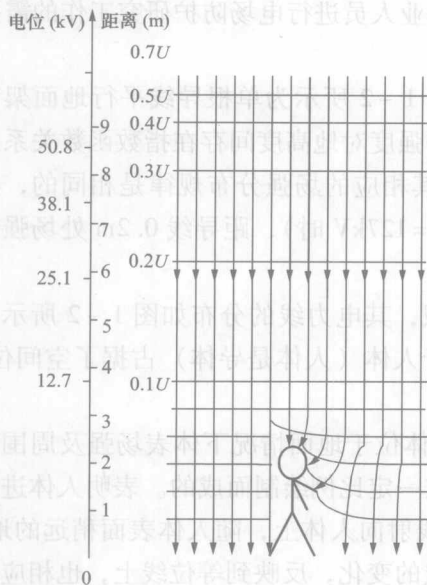


图 1-3 人员位于地面时人体引起的电场畸变

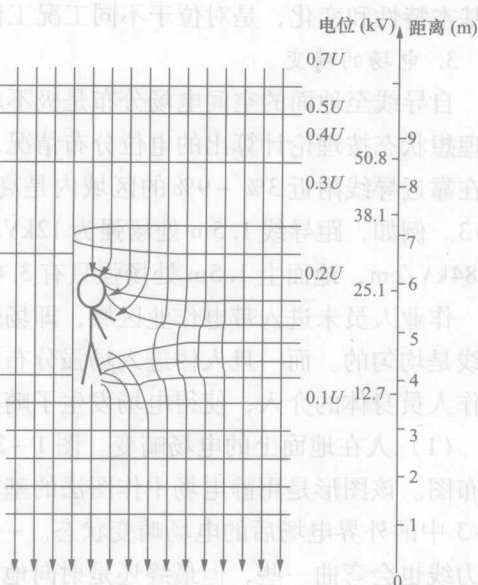


图 1-4 人员位于电场空间时人体引起的电场畸变

(3) 作业人员在等电位过程中的电场畸变。图 1-5 所示为人体已接近导线附近等电位前一瞬间及等电位后的电位分布图。转移电位（进入或脱离高电位）前的瞬间，由于导线附近场强本来就很高，人体介入所引起的电场畸变，使上举手指尖与导线间的那段空气间隙的平均场强值进一步加强，并随手的不断上移而快速升高。当其强度达到空气的临界击穿强度 $[E_c = 25 \sim 30 \text{ kV (幅值) / cm}]$ 时，空气间隙就会击穿而导致放电发生。放电前的最后一瞬间，手指尖端的体表场强达到最高值。发生放电前一瞬间的空气间隙长度称为火花放电距离 S_{f0} ，发生放电后随着人体不断逼近导线，放电也持续不断，直到手完全握住导线，空气间隙消失，放电才会停止。人体一旦与导线电位相等后，电场图形将从图 1-5 (a) 变到图 1-5 (b)。原先许多由导线表面发出的电力线，马上改到由人体的足尖发出。此时足尖的电力线密度最高，标志着此处的体表场强最高。人体头部只要不超过导线，其体表场强是较低的，甚至人体附近的那段导线的表面场强也会降低，这是人体的屏蔽作用产生的后果。

三、静电感应

在高压、超高压和特高压输电线路以及变电站进行带电作业时，由于静电感应可能会使得作业人员的人体遭受电击而危及生命。因此，静电感应的物理量、影响特征以及防护措施等是带电作业技术研究的重点。

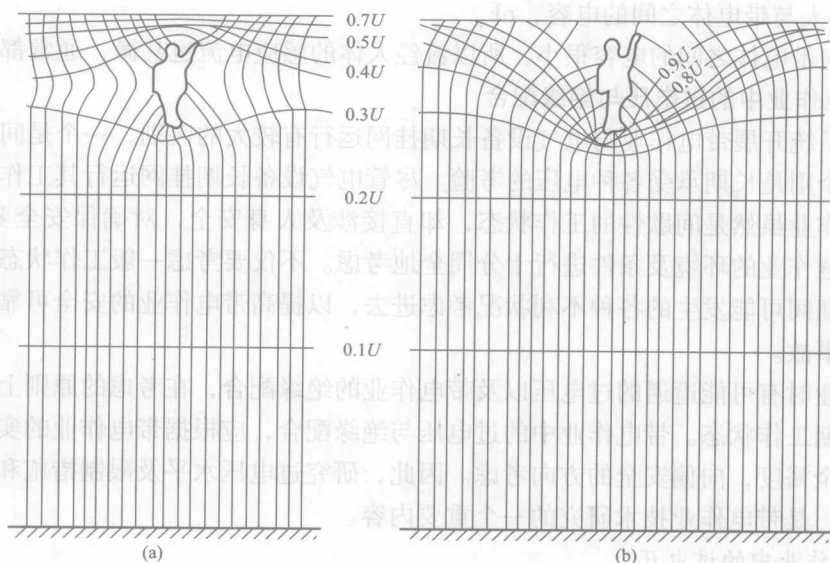


图 1-5 人体进入等电位过程中电位分布及电场畸变图

(a) 进入等电位前; (b) 进入等电位后

1. 静电感应产生的物理现象

直流电场是典型的静电场，而工频交流电场则是一种缓慢变化的电场，也可以视为静电场，因此，在工频电场中也存在静电感应问题。

当导体处于电场中，因静电感应导体表面产生感应电荷。感应电荷形成的电场与原来的电场叠加，使原来的电场产生畸变。由电场的计算可知：导体所引起电场畸变部分的电场将增大。导体的曲率半径越小，其表面的电场强度增大越多。例如，在实测电场中人体的表面场强时，人的鼻尖、手指尖、脚尖等部位的表面都比人体其他部位的体表场强高得多。

2. 表征静电感应的物理量

(1) 电场强度 (E)。由于静电感应是由电场引起的，因此为了便于描述输电变电设备周围静电感应的水平，通常都采用电场强度 (E) 这一物理量。

(2) 感应电压 (U_i)。在带电体周围的电场中，对地绝缘的导体因静电感应产生的感应电压值与导体的电压、导体的尺寸和几何形状、导体和带电体之间的电容、导体和接地体之间的电容等因素有关。可以根据电容分压原理求出导体上的感应电压 U_i 为

$$U_i = U \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_0} \quad (1-3)$$

式中 U ——带电体上的电压，kV；

C_1 ——导体对带电体之间的电容，pF；

C_0 ——导体对地之间的电容，pF。

(3) 感应电流 (I_i)。地面上的人在电场中，因静电感应产生流经人体而入地的感应电流 I_i ，可以近似地表示为

$$I_i = U \cdot j\omega C'_1 \quad (1-4)$$

式中 U ——带电体上的电压，kV；

C'_1 ——人与带电体之间的电容, pF。

由于人与带电体之间的电容很小, 所以流经人体的感应电流也甚微, 通常都为微安级。

四、带电作业中的过电压与绝缘配合

在电力系统开展带电作业与电气设备长期挂网运行有较大的区别, 一个是间歇性的工作条件, 另一个则是长期承受各种电压的考验。尽管电气设备长期挂网运行其工作环境十分苛刻, 但带电作业虽然是间歇性的工作状态, 却直接涉及人身安全, 对确保安全要求十分高, 因此应对带电作业的环境及条件进行十分周满地考虑。不仅要考虑一般工作状态, 同时需要将带电作业期间可能发生的各种不利状况考虑进去, 以提高带电作业的安全可靠性, 减少不必要的安全事故。

带电作业时有可能遭遇的过电压以及带电作业的绝缘配合, 在考虑的原则上应有别于电气装备的长期工作状态。带电作业中的过电压与绝缘配合, 应根据带电作业的实际工况, 留有足够的安全裕度, 向偏安全的方向考虑。因此, 研究过电压水平及限制措施和绝缘配合的原则和方法, 是带电作业技术研究的一个重要内容。

1. 带电作业中的过电压

(1) 过电压的类型。内部过电压又分为操作过电压和暂时过电压。操作过电压是由系统内的正常操作、切除故障操作或因故障(弧光接地等)所造成的过电压; 暂时过电压又称为短时过电压, 它包括工频电压升高和谐振过电压。

一般将内部过电压幅值与系统最高运行相电压幅值之比, 称为内部过电压倍数 K_0 , K_0 与电网结构、系统中各元件的参数、中性点运行方式、故障性质及操作过程等因素有关, 并具有明显的统计性。

1) 操作过电压。操作过电压的特点是幅值较高, 持续时间短, 衰减快。电力系统中常见的操作过电压有中性点绝缘电网中的间歇电弧接地过电压; 开断电感性负载(空载变压器、电抗器、电动机等)过电压; 开断电容性负载(空载线路、电容器组等)过电压; 空载线路切合闸(包括重合闸)过电压以及系统解列过电压等。操作过电压的大小是确定带电作业安全距离的主要依据。

a. 间歇电弧接地过电压。单相电弧接地过电压只发生在中性点不直接接地的电网(一般 10kV 系统都是中性点不直接接地), 如发生单相接地故障时, 流过中性点的电容电流, 就是单相短路接地电流。当电网线路的总长度足够长、电容电流很大时, 单相接地弧光不容易自行熄灭, 又不太稳定, 出现熄弧和重燃交替进行的现象即间歇性电弧, 这时过电压会较严重, 所以一相接地多次发生电弧, 不但会使另两相也短路接地, 还会引起另两相对地电容的振荡。理论上如果间歇电弧一直发生, 过电压会达到很高, 而实际上, 每次发弧不一定都在幅值, 还有其他损耗衰减, 所以一般不超过 $3U_N$, 个别达 $3.5U_N$ 以上。

b. 开断电感性负载过电压。进行切断空载变压器、电抗器、电动机、消弧线圈等感性负载的操作时, 储存在电感元件上的磁能 $\bar{W} = \frac{1}{2} L_1^2$ 要转化为电场能量, 而系统又无足够的电容来吸收磁能, 而且开关的灭弧性太强, 在 $t \rightarrow 0$ 时, 励磁电流变化率 $\frac{di_0}{dt} \rightarrow \infty$ (无穷大), 将在励磁电感 L 上感应过电压 $U_L = -L \frac{di}{dt} \rightarrow \infty$ 。在中性点不直接接地电网中, 一般不

大于 $4U_N$ ；中性点直接接地电网中，一般不大于 $3U_N$ 。其过电压倍数与断路器结构、回路参数、变压器结构接线、中性点接地方式等因素有关。

c. 空载线路切合（包括重合闸）过电压。切合电容性负载，如空载长线路（包括电缆）和改善系统功率的电容器组，由于电容的反向充放电，使断路器触头断口间发生了电弧的重燃。这是因为纯电容电流在相位上超前电压 90° ，过 $1/4$ 周期电弧电流经0点时熄灭，但此时电压正好达到最大值，若开关断口弧隙的绝缘尚未恢复正常，电容电荷充积断口， $U=U_N$ ，再经过半周期电压反向达到最大值， $U=2U_N$ ，并伴随高频振荡过程。按每重燃一次增加 $2U_N$ ，理论上过电压将按3、5、7、9倍相电压增加，而实际上过电压只有 $3\sim 4U_N$ 。断路器如果灭弧性能好，断口绝缘恢复快的，不一定都重燃，而每次重燃时也不一定是电压最大值时。母线有多条时比只有一条时过电压小一些，另外线路上也有电晕和电阻损耗起阻尼作用。一般中性点直接接地或经消弧线圈接地的系统过电压不大于 $3U_N$ ，中性点不接地系统过电压的最大值达 $3\sim 3.5U_N$ 。

2) 暂时过电压。暂时过电压包括工频电压升高和谐振过电压。

工频电压升高的幅值不大，但持续时间较长、能量较大，所以在考虑带电作业绝缘工具的泄漏距离时常以此为依据。

造成工频电压升高的原因主要为不对称接地故障、发电机突然甩负荷、空载长线路的电容效应等。不对称接地故障是线路常见的故障形式，其中以单相接地故障为最多，引起的工频电压一般也最严重。对于中性点绝缘的系统，单相接地时非故障相的对地工频电压可升高到1.9倍相电压，对于中性点接地的系统可升高到1.4倍。

电网系统内一系列的电气设备（线路、变压器、发电机等）组成复杂的电感、电容振荡回路。在正常的情况下，由于负载的存在或线路两端与系统电源连在一起，自由振荡不可能发生。在操作或故障时，不对称状态下（如断线、非全相拉合闸、TV饱和等），适当的参数组成了共振回路 $\left(\omega L = \frac{1}{\omega C}\right)$ ，激发很高的过电压，其必要条件是电路固有自振频率与外加电源频率相等 $f_0 = f$ （即 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega}{2\pi}$ ），或成简单分次谐波，电路中就出现了电压谐振。

常见谐振过电压有参数谐振、非全相拉合闸谐振、断线谐振等。谐振过电压事故是最频繁的，在 $35\sim 330\text{kV}$ 电网中都会发生，一般不会大于 $3U_N$ 。但持续时间比较长，会严重影响系统安全运行。

(2) 带电作业中的作用电压类型。电气设备在运行中可能受到的作用电压有正常运行条件下的工频电压、暂时过电压（包括工频电压升高）、操作过电压与雷电过电压。

在DL 409—1991《电业安全工作规程（电力线路部分）》中规定：“雷电天气时不得进行带电作业”。因此，带电作业时除不必考虑雷电过电压外，正常运行条件下的工频电压、暂时过电压（包括工频电压升高）与操作过电压的作用在带电作业时均应仔细考虑。

正常运行条件下，工频电压会有某些波动，且系统中各点的工频电压并不完全相等，即网络中不同的点各不相同，系统中由于“长线容升效应”会使得某些点的电压比系统的标称电压高，但所有相关标准都规定：系统中各点的工频电压不得超过设备最高电压。由于各个电压等级下的电压升高系数不完全一样，一般 220kV 及以下电压等级的电压升高系数为

1.15 (66kV 例外, 为 1.1), 330kV 及以上电压等级的电压升高系数为 1.1 (但 750kV 为 1.067, ± 500 kV 直流系统则为 1.03)。即设备最高电压与系统标称电压之比在 1.03 ~ 1.15 之间。

前面所叙及的操作过电压种类中, 带电作业不考虑线路合闸过电压。带电作业一般停用重合闸, 在这种工况时, 不考虑线路重合闸过电压; 而带电作业没有停用重合闸时, 则应考虑线路重合闸过电压。因此, 带电作业时电力系统的运行状况是带电作业, 进行绝缘配合和安全防护的重要依据。

2. 带电作业中的绝缘配合

(1) 带电作业中的绝缘类型。带电作业绝缘工具、装置和设备的绝缘一般可分为两类, 一类为自恢复绝缘; 另一类为非自恢复绝缘。严格地说, 带电作业中除塔头空气间隙、组合间隙为自恢复绝缘之外, 一般带电作业绝缘工具、装置和设备的绝缘均为非自恢复绝缘, 如绝缘操作杆、绝缘支拉吊杆、绝缘硬梯、绝缘软梯、绝缘托瓶架、绝缘斗臂车的绝缘臂、带电清扫机的绝缘支架等。这类绝缘外表面为空气, 当火花放电发生在固体绝缘的沿面时, 火花放电过后, 绝缘能自动恢复, 也就是说, 发生在自恢复绝缘中的破坏性放电能自恢复。而发生在固体绝缘内部的放电, 则为不可逆的绝缘击穿。故可以认为, 绝缘操作杆、绝缘支拉吊杆、绝缘硬梯、绝缘软梯、绝缘托瓶架、绝缘斗臂车的绝缘臂、带电清扫机的绝缘支架等带电作业绝缘工具、装置和设备为由自恢复绝缘和非自恢复绝缘组成的复合绝缘。

(2) 绝缘耐受能力。对于绝缘操作杆、绝缘支拉吊杆、绝缘硬梯、绝缘软梯、绝缘托瓶架、绝缘斗臂车的绝缘臂、带电清扫机的绝缘支架等带电作业绝缘工具、装置和设备进行绝缘试验时, 在 50% 放电电压下可能是非自恢复的, 因为进行 50% 放电电压试验时所施加的电压值较高, 例如进行带电作业空气间隙的 50% 放电电压试验, 通常施加 40 次试验电压, 其中约 20 次需闪络放电; 而在额定耐受电压下是自恢复的, 不允许发生任何放电。所以对空气间隙、组合间隙的绝缘等自恢复绝缘进行 50% 的破坏性放电试验; 而带电作业用的工具、装置和设备绝缘等自恢复与非自恢复的混合型复合绝缘则进行 15 次冲击耐压试验。

(3) 作用电压与耐受电压之间的配合。在 3 ~ 220kV 电压范围内的带电作业用工具、装置和设备, 其基准绝缘水平是按额定雷电冲击耐受电压和额定短时工频耐受电压给出的。因此它能满足正常运行电压和暂时过电压的要求。所以对 3 ~ 220kV 电压范围内的带电作业用工具、装置和设备所进行的试验考核, 只需进行短时工频电压试验, 时间为 1min。这一电压等级范围内不规定操作冲击耐受试验。

在 330 ~ 750kV 电压范围内的带电作业用工具、装置和设备需进行两种类型电压的试验考核。其一, 进行较长时间的工频电压试验 (产品的型式试验的持续时间为 5min、绝缘的预防性试验为 3min), 其原因是在这一电压范围内, 绝缘应考虑暂时过电压的幅值及持续时间, 同时考虑内绝缘的老化及外绝缘耐受污秽性能的适应性。其二, 进行操作冲击电压试验, 这里对空气间隙、组合间隙的绝缘等自恢复绝缘进行 50% 的破坏性放电试验; 而带电作业用的工具、装置和设备绝缘等自恢复与非自恢复的混合型复合绝缘则进行 15 次冲击耐压试验, 不允许发生任何闪络放电, 这与一般电气设备的 15 次冲击耐压试验, 允许不超过 2 次闪络放电的规定有较大不同, 其原因是带电作业直接涉及人身安全, 对确保安全要求应高一点, 换言之, 即 15 次冲击耐压试验的耐受概率更高。

(4) 绝缘配合方法的选择。绝缘配合方法有确定性法（惯用法）、统计法及简化统计法。

1) 确定性法（惯用法）。按惯用法进行绝缘配合时，需要确定作用于工具、装置和设备上的最大过电压，工具、装置和设备绝缘强度的最小值，以及它们两者之间的裕度。在确定裕度时，应尽量考虑可能出现的不确定因素，这里并不要求估计绝缘可能击穿的故障率。这种绝缘配合方法，类似于给出一定安全系数的做法。惯用法的适用范围，是非自恢复绝缘和 220kV 及以下电压等级的系统。

惯用法是目前采用得最广泛的绝缘配合方法，其基本出发点是使带电作业间隙或工具的最小击穿电压值高于系统可能出现的最大过电压值，并留有一定的安全裕度。

在绝缘配合惯用法中，系统最大过电压、绝缘耐受电压与安全裕度三者之间的关系为

$$A = \frac{U_w}{U_{0 \cdot \max}} = \frac{U_w}{U_N \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot K_r \cdot K_0} \quad (1-5)$$

式中 A ——安全裕度；

U_w ——绝缘的耐受电压，kV；

$U_{0 \cdot \max}$ ——系统最大过电压，kV；

U_N ——系统额定电压，kV；

K_r ——电压升高系数；

K_0 ——系统过电压倍数。

2) 统计法。统计法的根据是假定过电压和绝缘强度的概率分布函数是已知的，以及通过试验得到的，可利用在大量统计资料的基础上的过电压概率密度分布曲线，得到绝缘放电电压的概率密度分布曲线，然后用计算的方法求出由过电压引起绝缘损坏的故障概率，将允许的最大故障率作为绝缘设计的一个安全指标。在技术经济比较的基础上，正确地确定绝缘水平。

在带电作业中，通常将绝缘破坏的概率称为危险率。带电作业的危险率 R_0 为

$$R_0 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_0(u) P_d(u) du \quad (1-6)$$

$$P_0(u) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u - U_{av}}{\sigma_0} \right)^2} \quad (1-7)$$

$$P_d(u) = \int_0^u \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U - U_{50}}{\sigma_d} \right)^2} \cdot dU \quad (1-8)$$

式中 $P_0(u)$ ——操作过电压幅值的概率密度分布函数；

$P_d(u)$ ——空气间隙在幅值为 U 的操作过电压下放电的概率分布函数；

U_{av} ——操作过电压平均值，kV；

σ_0 ——操作过电压的标准偏差，kV；

U_{50} ——空气间隙的 50% 放电电压，kV；

σ_d ——空气间隙放电电压的标准偏差，kV。

运用上述数学模型可编制计算程序，根据试验结果计算相应的带电作业危险率。在计算中，系统相对地最大操作过电压为 $U_{0.13\%}$ ，操作过电压平均值 U_{av} 为

$$U_{av} = \frac{U_{0.13\%}}{1 + 3[\sigma]} \quad (1-9)$$

式中 $[\delta]$ ——过电压相对标准偏差。

3) 简化统计法。由于实际工程中采用统计法进行绝缘配合是相当繁琐和困难的, 因此, 通常采用“简化统计法”。由 IEC 推荐的简化统计法, 是对过电压和绝缘电气强度的统计规律作出一些合理的假设, 如正态分布, 并已知其标准偏差等, 这就使得过电压和绝缘电气强度的概率分布曲线可用与某一参考概率相对应的点来表示, 称为“统计过电压”和“统计绝缘耐压”。在此基础上可以计算绝缘的故障率。

统计法、简化统计法适用于 330kV 及以上系统带电作业空气间隙、组合间隙及工具、装置和设备的操作过电压的绝缘配合。

五、带电作业的高压绝缘及其特性

绝缘材料在带电作业中占有非常重要的地位, 是确保作业人员人身安全和电气设备安全的物质基础。它不仅起着将高电位对地隔离的作用, 也承担一定机械力的作用。可以这样说, 如果没有高性能优良的各类绝缘材料的不断引入, 带电作业就不能蓬勃发展。因此, 绝缘材料的电气特性、机械特性、老化特性等都是带电作业技术应深入研究的领域。

绝缘材料在物理学中称为“电介质”, 电介质有多种分类方法。按形态分, 有气体、液体和固体三大类; 按结构分, 有中性型、偶极型和离子型三大类。

电介质的品种极其繁多, 不仅有无机的, 还有有机的; 有机介质中还有天然与人工合成之分。带电作业所使用的电介质尽管气体、液体和固体三大类形态中都有涉及, 但只占有绝缘材料中很少一部分。

1. 气体绝缘材料

气体绝缘材料有空气、SF₆ 气体等, 目前, 带电作业中所涉及的气体绝缘主要是空气, 它广泛存在于带电作业的各种间隙中。因此, 空气绝缘是带电作业中重要的研究对象。

当今高压绝缘的研究结果可知, 空气的密度 (涉及不同海拔高度的影响)、湿度 (包括

相对湿度和绝对湿度) 和温度等对空气绝缘的放电特性有不同程度的影响, 但其规律还有待进一步进行探索和总结。

在带电作业中大量使用的绝缘支拉吊杆、绝缘操作杆和绝缘绳, 用于高压电场的纵向绝缘。严格地说, 它是空气和固体绝缘材料的混合绝缘, 是一种自恢复绝缘和非自恢复绝缘的复合绝缘。固体绝缘材料的沿面闪络, 实际上是空气绝缘闪络特性中的一个特例。绝缘子串、绝缘杆、绝缘绳的沿面闪络强度特性是带电作业技术中长盛不衰的实验研究课题。图 1-6 所示为绝缘杆的工频闪络特性曲线。

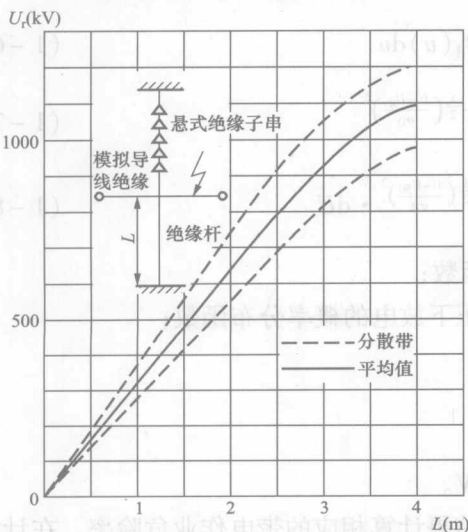


图 1-6 干态下, 绝缘杆的工频闪络特性曲线

2. 固体绝缘材料

固体绝缘材料是在带电作业中大量使用的绝