

配电线路带电作业 技术与^与管理

浙江省电力公司配网带电作业培训基地 组 编
史兴华 主 编
张 劲 张文杰 副主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

要 献 育 内

配电线路带电作业 技术与[●]管理

浙江省电力公司配网带电作业培训基地 组 编

史兴华 主 编

张 劲 张文杰 副主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

配电线路带电作业技术在提高供电可靠性方面具有重要的意义,在我国得到广泛的应用,总体水平也不断提高。

本书从知识够用、强调技能的角度,结合配电带电作业基础理论,阐述和分析了操作技能和管理制度。本书共分为两个部分:第一部分共7章,介绍配电线路带电作业基础,主要讲述了配电线路带电作业的基本方法、原理和管理制度等;第二部分共18章,介绍10kV配电线路带电作业操作技能,讲解带电作业原理和案例。

本书可以作为配电线路带电作业工的入门教材和配电线路工的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

配电线路带电作业技术与管理/史兴华主编;浙江省电力公司配网带电作业培训基地组编. —北京:中国电力出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-5123-0579-3

I. ①配… II. ①史…②浙… III. ①配电线路—带电作业
IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第118028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)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010年7月第一版 2010年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.5印张 527千字

印数0001—3000册 定价 45.00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



配电线路带电作业技术在提高供电可靠性方面具有重要的意义,在我国得到广泛的应用,总体水平也不断提高。本书从知识够用、强调技能的角度,结合配电线路带电作业基础理论,阐述和分析了操作技能和管理制度。本书共分为两个部分:第一部分共7章,介绍配电线路带电作业基础,主要讲述了配电线路带电作业的基本方法、原理和管理制度等;第二部分共18章,介绍10kV配电线路带电作业操作技能,讲解带电作业原理和案例。本书可以作为配电线路带电作业工的入门教材和配电线路工的辅助教材。

本书由浙江省电力公司配网带电作业培训基地组织编写,湖州电力局史兴华担任主编,浙江省电力公司生产技术部张劲、湖州电力局张文杰担任副主编。参与编写的同志都具有丰富的现场经验和教学经验。其中第一部分的第一章由金华电力局应伟国、浙江省电力公司生产技术部钟晖编写,第二、三、六章由浙江湖州电力技术培训中心杨晓翔编写,第四、五章由浙江湖州电力技术培训中心陈伟、周兴、赵鲁冰编写,第七章由浙江省电力公司生产技术部钟晖、杭州市电力局金涛、浙江湖州电力技术培训中心杨晓翔编写。第二部分的第一~三章由浙江湖州电力技术培训中心赵鲁冰编写,第四~六章由浙江湖州电力技术培训中心周兴编写,第七、八、十三章由浙江湖州电力技术培训中心杨晓翔编写,第九~十一章由杭州市电力局金涛编写,第十二、十四章和第十五章由浙江湖州电力技术培训中心陈伟编写,第十六、十七章由浙江湖州电力技术培训中心杨晓翔编写,第十八章由湖州电力局张文杰、浙江湖州电力技术培训中心杨晓翔编写。湖州电力局张鹰、金华电力局应伟国、湖州电力局姚志伟等对本书进行了审核,全书由史兴华、张劲、张鹰、杨晓翔统稿。

在编写本书的过程中,得到了国网电力科学研究院带电作业研究所和其他有关部门诸多专家的指导,在此表示向他们衷心的感谢。本书引用或参考了相关文献,部分图片和文字摘自互联网,在此向其作者一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,本书难免存在不足之处,敬请批评指正!

编者

2010年6月

第一节 保证带电作业安全的技术措施	1
第二节 保证带电作业安全的管理措施	2
第三节 其他安全要求	3
第四节 现场站班会、收工会	4
第五节 现场作业指导书	5
第七章 配电线路带电作业日常工作管理	10
第一节 资料管理	11
第二节 台账工具管理	12
第三节 配电线路带电作业管理	13



前言

第一部分 配电线路带电作业基础

第一章 概论	2
第二章 带电作业基础知识	6
第一节 电流的防护	6
第二节 电场、静电感应的防护	11
第三节 带电作业安全距离、绝缘有效长度及良好绝缘子片数	15
第四节 带电作业气象条件	21
第三章 配电线路带电作业方法	23
第一节 带电作业基本方法简介	23
第二节 配电线路带电作业方法及其原理	24
第四章 配电线路带电作业工器具	31
第一节 高压绝缘基本知识	31
第二节 配电线路带电作业工器具	33
第三节 高架绝缘斗臂车	39
第五章 绝缘工器具试验	45
第一节 试验简介	45
第二节 绝缘工具使用中的试验要求	47
第三节 绝缘防护用具预防性试验要求	48
第四节 高架绝缘斗臂车的试验	50
第六章 配电线路带电作业的工作制度	51
第一节 保证带电作业安全的技术措施	52
第二节 保证带电作业安全的组织措施	56
第三节 其他安全要求	58
第四节 现场站班会、收工会	62
第五节 现场作业指导书	63
第七章 配电线路带电作业日常工作管理	67
第一节 资料管理	67
第二节 绝缘工器具管理	68
第三节 配电线路带电作业的经济和社会效益管理	69

第四节 项目管理	72
----------------	----

第二部分 10kV 配电线路带电作业操作技能

第一章 绝缘杆作业法临近带电作业	79
第二章 绝缘杆作业法带电断、接引线	93
第三章 绝缘杆作业法带电更换跌落式熔断器	110
第四章 绝缘杆作业法带电更换直线杆组件	126
第五章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法临近带电作业	136
第六章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带电简易安装、测量、调试、消缺	153
第七章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带电断、接引线	162
第八章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带电撤、立杆	190
第九章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法耐张杆带电耐张作业	203
第十章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法直线杆带电更换组件	214
第十一章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带电更换（安装）柱上开关设备	224
第十二章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带电单侧架设（更换）导线	236
第十三章 绝缘斗臂车绝缘手套作业法带负荷更换柱上开关设备	245
第十四章 绝缘斗臂车绝缘杆作业法带电断、接引线	256
第十五章 绝缘斗臂车绝缘杆作业法带电简易安装、调试、测量、消缺	264
第十六章 绝缘平台绝缘手套作业法带电断、接引线	273
第十七章 绝缘平台直接作业法带电更换柱上开关设备	283
第十八章 旁路综合性作业	294
第一节 设备器材	294
第二节 作业过程解析	301
第三节 10kV 架空配电线路旁路综合性作业现场标准化作业指导书	306
附录 1 电力线路带电作业现场勘查单	323
附录 2 电力线路带电作业工作票格式	325
附录 3 电力线路带电作业现场标准化作业指导书格式	327
附录 4 配电带电作业用高架绝缘斗臂车电气试验标准表	331
附录 5 旁路综合性作业设备出厂试验报告	332
附录 6 起重吊运手势信号	333
参考文献	336

第一部分 配电线路带电作业基础

- 第一章 概论
- 第二章 带电作业基础知识
- 第三章 配电线路带电作业方法
- 第四章 配电线路带电作业工器具
- 第五章 绝缘工器具试验
- 第六章 配电线路带电作业的工作制度
- 第七章 配电线路带电作业日常工作管理



概 论

配电网络是直接面向用户的电力基础设施，具有网络复杂、覆盖面大的特点。由于配电网络绝缘水平低，在大气过电压、污秽或其他外界因素作用下易发生故障，检修工作量大，难以满足可靠供电的要求。带电作业是电力设备测试、检修、改造的重要手段，而且有待发展成为预知维修和状态检修的主要手段，它为减少停电损失、降低线损、提高可靠性指标、开展在线监测和状态检修发挥重要作用。

带电作业 (live working) 是指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。采用的方法有绝缘杆作业 (indirect working 或 hard pole working)、绝缘手套作业 (insulating glove working) 和等电位作业 (equal potential working)。

带电作业的工作内容主要包括：在输电设备上采用等电位作业方式进行的工作；在输、配电线路设备近旁采用操作杆、测量杆进行的作业；在配电设备近旁，将带电部分绝缘隔离，使用高架绝缘斗臂车、绝缘平台等与地电位隔离，采用绝缘手套进行的直接作业；对线路绝缘子串、变电站绝缘子串、变电设备瓷套、瓷柱进行的带电水冲洗。不包括运行人员验电、变电人员使用核相仪器核相序、对带电变压器的风扇进行水冲洗等作业。此外，设备脱离了高电位、置于地电位进行的检修作业不属于带电作业。

一、我国带电作业技术发展历程

我国的带电作业起步于 20 世纪 50 年代初，当时的电力工业基础薄弱、网架单薄、设备陈旧，经常需要停电检修和处理缺陷。1952 年 5 月，鞍山钢铁公司恢复和扩建，随着钢铁产量的大幅度增加，鞍钢的用电量从 1949 年的 0.8201 亿 kWh 猛增到 1952 年底的 2.7395 亿 kWh。为减少停电检修对鞍钢建设和生产的影响，鞍山电业局从 1952 年 5 月起，革新并开展了配电 (3.3~6.6kV) 油开关套管的带电清扫、带电检测 (22~44kV) 线路绝缘子串，带电测量导线接头电阻等带电作业工作，避免了多次事故。

1954 年 5 月 12 日，鞍山电业局号召职工开展技术革新，提出 6 个课题，其中第 5 个课题为“创造各种带电作业绝缘工具”。当时营口市电业局的工人们提出合理化建议和技术革新方案 81 件，当年研制出带电作业工具 13 件。“5 月 12 日”作为鞍山电业局带电作业始创日进入局史，同样这天也成为“中国带电作业日”。

1955 年，电力工业部派人赴苏联学习带电作业技术。同年鞍山电业局成功研制出 3.3kV 更换电杆、木横担和针式绝缘子的全套带电作业工具。

1957 年，东北电业管理局首次在 154~220kV 高压线路上进行不停电检修。1958 年，又进一步研究等电位作业的技术问题，并成功在 220kV 线路上首次进行等电位带电检修线

夹的工作。

1958~1985年,由于电网结构比较脆弱,基本是一线带多个变压器或单一供电,对带电作业项目的研发比较紧迫。全国的带电作业项目有多次革新,比如带电换电杆、带电换横担、带电复(换)导线、带电水冲洗、带电跨越架线、带电换开关立柱、带电测试避雷器或互感器、带电短接阻波器、沿绝缘子串自由进入电场、带电爆压导线、缺相(短接)检修等,上海开展了高架绝缘斗臂车带电检修、消缺等作业。

1969年,在广州进行“10kV人体接地试验”,证明身穿均压服(屏蔽服,I型屏蔽服通流容量5A,II型通流容量30A)在10kV单相触电时能保护人身安全。随后,在10kV配电线路上开展的带电作业多采用穿屏蔽服等电位作业的方法。后经大量的带电作业事故证明,由于屏蔽服通流能力和系统中性点运行方式等因素,此种方法是危险的。现在配电线路上开展带电作业均使用采用绝缘遮蔽隔离和个人绝缘安全防护措施的中间电位作业方法。

20世纪70年代法国等西方国家来访,我国电业工人展示了带电作业项目。期间电力工业部(水利电力部)还派出多批人员赴阿尔巴尼亚等国家培训带电作业技术。

二、我国带电作业安全规程的演变

1956年6月14日,鞍山电业局成立了中国第一个带电作业专业组,制定《不停电检修工作规程》等规程。规程要求带电作业人员应具有4级以上的工人技术等级和3级以上的安全技术等级;工作负责人应具有7级以上的工人技术等级或技师和5级以上的安全技术等级,文化水平小学4~6年级以上。

1958年1月,鞍山电业局制定《3.3~66kV送电线路带电检修暂行安全工作规程(木杆、水泥杆、铁塔)》,3月又制定了《3.3~66kV送配电线路带电检修现场操作规程》。

1960年5月,辽吉电业管理局指定《高压架空线路不停电检修安全工作规程》,主要讲述在不停电线路上的安全组织措施和技术措施等。此规程指导全国带电作业10余年。

1973年8月12日,水利电力部在北京召开全国带电作业现场表演会。大会技术组提交的《带电作业安全技术专题讨论稿》,为统一制定全国性带电作业安全工作规程奠定了技术基础。1977年12月21日,水利电力部以[77]水电生字第113号文件颁发《电业安全工作规程》发电厂和变电站部分及电力线路部分两本规程(即1977版规程),正式将带电作业纳入部颁安全规程。

1978年,水电部生产司委托山东、四川、山西省编写《电业安全规程(电力线路部分)》的条文说明,其中带电作业一章由东北电管局编写。由此有了1982年版带条文说明的《电业安全规程》,主要内容等同于1977年版。

1984年,水电部生产司又组织编写了1978年版《电业安全规程(带电作业部分)》的条文说明。

1990年,能源部颁布DL 409—1991《电业安全工作规程(电力线路部分)》(行业标准,目前仍然有效)。

2003年,国家电网公司发布了《国家电网公司电力安全工作规程—带电作业部分(试行)》(电网安监[2005]83号)。

随后,带电作业在全国得到了广泛的推广应用,从10kV配电线路到500kV输电线路,从检测、更换绝缘子、线夹、间隔棒等常规项目到带电升高、移位杆塔等复杂项目均有开展。近年来,开展了紧凑型线路、同塔多回线路、750kV线路和特高压交/直流输电线路带

电作业的研究及应用。

三、配电线路带电作业前瞻

人工带电作业是一项艰苦繁重又具有一定危险性的工作，需要引入先进可靠的新技术和新方法来降低劳动强度，保证作业的安全性。配电带电作业机器人的问世提供了十分理想的解决方案。

“十五”期间，国家 863 计划连续用两个项目“配电带电作业机器人”（2002AA4200110-5）和“10kV 电力线路带电作业机器人”（2005AA420062）支持了带电作业机器人的研究。高压带电作业机器人是 1999 年国家电力公司第二批重点科技攻关项目。

高压带电作业机器人是一个复杂的系统，主要由机器人升降系统、作业机器人本体、机器人控制系统、机器人专用工具、高压绝缘防护系统等几个部分组成。该机器人可以完成 10kV 及以下电压等级高压线路的带电断线、带电 T 接线、带电更换绝缘子、带电短接（更换）跌落式熔断器、带电修补导线等带电检修工作。

多级空间避障算法和双臂自主协调防碰理论的应用，使机器人可以在复杂的工作环境中灵活作业；创新地采用多级绝缘技术、安全防护措施，成功地解决了 10kV 高压绝缘问题；主手采取与从手异型同构的结构，使从手运动控制直观、简单。

（1）机器人的作业机械手结构精巧，它所具有的冗余自由度能够躲避相邻相线及线路设备形成的障碍，适合我国最常见的三角形布置的架空线路，更能适用于平行布置的三相线路。双机械手能够协调作业。

（2）机器人采用了多重绝缘的复合式绝缘，绝缘斗舱平台作为主绝缘、电绝缘式作业机械手作为辅助绝缘，实现了操作员中间电位和机器人中间电位的带电作业方式，绝缘斗舱中的操作员不再接触高压线。

（3）研制的一套专用作业工具能够满足带电更换跌落开关作业的需要。要满足更多作业项目的要求，还需要更多的专用工具。机械手上的标准化的快装工具接口为研制新的工具提供了良好的基础。

（4）主绝缘交流耐压达到 95kV，辅助绝缘交流耐压达到 50kV。机器人的耐压和绝缘距离均达到了人工带电作业的国家标准。

机器人带电作业如图 1-1-1~图 1-1-3 所示。

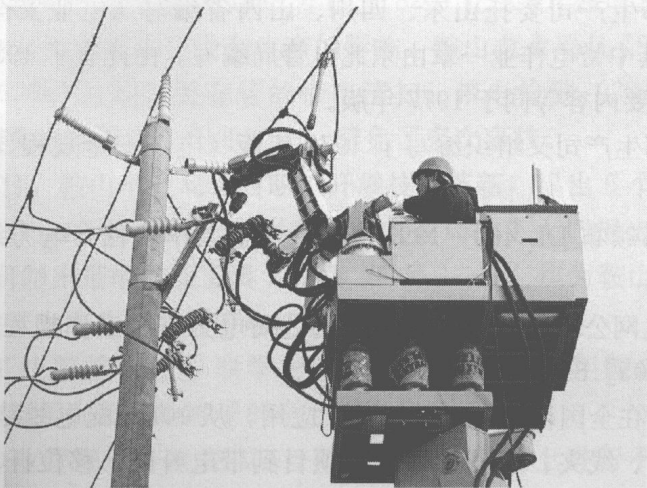


图 1-1-1 机器人带电作业（一）

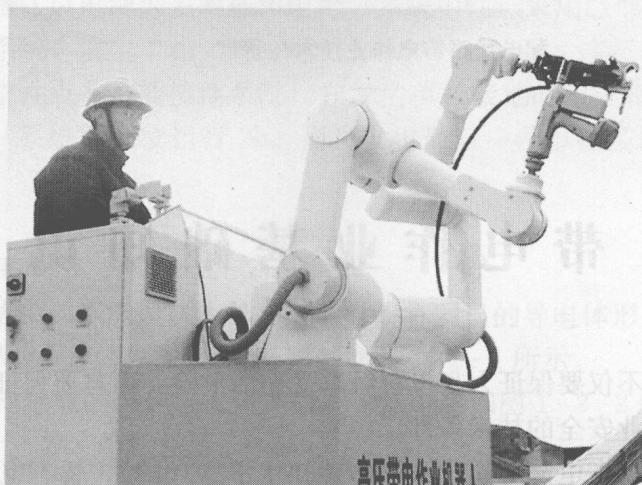


图 1-1-2 机器人带电作业 (二)



图 1-1-3 机器人带电作业 (三)



带电作业基础知识

带电作业过程中不仅要保证人身没有触电受伤的危险，而且要保证作业人员没有不舒服的感觉。保证带电作业安全的技术条件：

- (1) 流过人体的稳态电流不超过人体的感知水平（1mA）、暂态电击不超过人体的感知水平（0.1mJ）；
- (2) 人体体表局部场强不超过人体的感知水平（2.4kV/cm）；
- (3) 保证可能导致对人体放电的空气距离（安全距离）足够大。

第一节 电流的防护

一、人体电阻和导电情况

人体各种组织的电阻各不相同。血液的电阻值最小（约 500Ω ），肌肉、神经、骨骼、脂肪、皮肤电阻值依次增大，表皮角层的电阻最大，其电阻系数为 $292\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{mm}$ 。角质层虽然只有 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 厚，却占人体总电阻的很大比例。皮肤潮湿和出汗会使人体电阻降低，人体通过电流时电阻也会发生变化；接触的电压越高，通过的电流越大，通电的时间越长，人体电阻也会降低。总之，人体电阻在不同的情况下其数值是变化的。所以在工作中若出现皮肤损伤或大量出汗的情况，人体电阻值会大大降低，导电性能大大增加，这时触电是很危险的。因此国家劳动保护一般按人体出汗状况取人体电阻 1500Ω 。在分析带电作业原理时，通常把人体看成良导体。

【例 1-2-1】 如人体在 220V 设备上触电，通过人体的电流为多少？

解 已知 $R_b=1500\Omega$ ， $U=220\text{V}$ ，则

$$I = \frac{U}{R_b} = \frac{220}{1.5 \times 10^3} \approx 146(\text{mA})$$

答：通过人体的电流为 146mA。

二、人体触电方式

一般带电作业中人体触电的方式有单相触电、两相触电、跨步电压和接触电压触电。带电作业作业人员的位置和带电作业事故统计表明，单相触电的机会最多，所占比例最大。而触电电流的大小和系统中性点运行方式密切相关，我国 10kV 配电网中性点的运行方式为：

- (1) 不接地。电网的单相接地电流小于等于 30A 时，中性点采用不接地运行方式。
- (2) 经消弧线圈接地。如不满足第一个条件，则采用中性点经消弧线圈接地运行，且将单相接地电流限制在 10A 以内。

(3) 经低阻抗接地。以电缆为主的城市电网，系统中性点采用经低阻抗接地的运行方式属于中性点有效接地系统，发生单相接地时电流为 600~1000A。

前两种方式属于中性点非有效接地系统，在发生单相接地时，三相系统仍旧保持对称，变电站开关不会跳闸，系统可继续运行 2h。而当发生最后一种单相接地时，变电站开关瞬时跳闸。

(一) 单相触电

1. 中性点不接地系统

中性点不接地系统中，不能误认为单相触电时没有明显的导体形成通电回路，对人体威胁不大而产生疏忽大意的思想。此时电路原理如图 1-2-1 所示。

W 相通过空气对地绝缘的部分与人体并联，等值电路如图 1-2-2 所示。

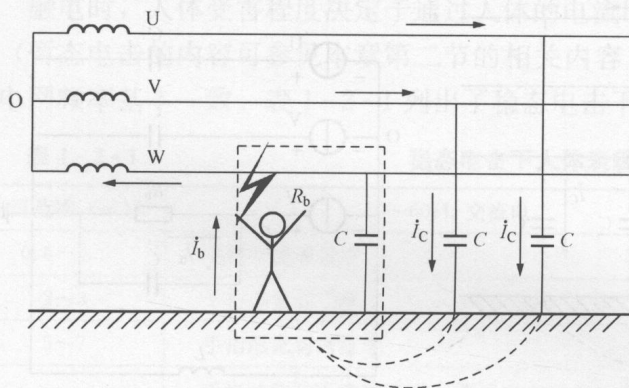


图 1-2-1 中性点不接地系统发生单相触电原理图

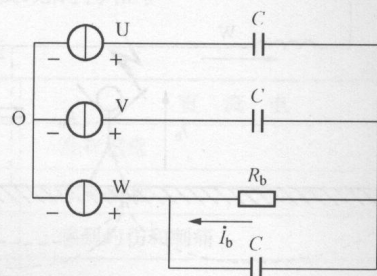


图 1-2-2 中性点不接地系统发生单相触电等值电路

根据节点电压法，可得

$$\dot{U}_0 = \frac{-\frac{\dot{U}_U}{Z_C} - \frac{\dot{U}_V}{Z_C} - \frac{\dot{U}_W}{R_b // Z_C}}{\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{R_b // Z_C}} = -\dot{U}_W \cdot \frac{Z_C}{Z_C + 3R_b}$$

所以人体触电电流

$$\dot{I}_b = \frac{-\dot{U}_W - \dot{U}_0}{R_b} = -3 \frac{\dot{U}_W}{Z_C + 3R_b}$$

有效值为

$$I_b = \frac{3U_{ph}}{|Z_C + 3R_b|} = \frac{3U_{ph}}{\sqrt{Z_C^2 + 9R_b^2}}$$

式中 U_{ph} ——电源相电压；

Z_C ——线路对地容抗， $Z_C = X_C = \frac{1}{\omega C_0 L}$ ， C_0 为导线对地的分布电容， L 为线路长度；

R_b ——人体电阻。

可见，当人体电阻一定时（1500Ω），触电电流值决定于电源相电压和线路对地容抗的大小，线路越长，容抗越小，触电电流就越大。

如以一个单相接地电流为 $I_c = 30A$ 的 10kV 系统来估算，则 $Z_C = \frac{3U_{ph}}{I_c} = \frac{3 \times 10 \times 10^3 / \sqrt{3}}{30} \approx$

577 (Ω), 在这样的 10kV 电网中经人体发生单相接地短路, 流过人体的电流为

$$I_b = \frac{3U_{ph}}{|Z_c + 3R_b|} = \frac{3 \times 10 \times 10^3 / \sqrt{3}}{\sqrt{577^2 + 9 \times 1500^2}} \approx 3.82(\text{A})$$

如果不是经人体发生接地短路, 而是发生金属性接地短路, 则相当于人体电阻 $R_b = 0$, 那么限制回路电流的阻抗就是导线对地电容的容抗, 所以 $I_b \approx 3\omega C_0 L U_{ph}$, 这就是单相金属性接地时接地电流(容性)的计算公式。

2. 中性点经消弧线圈接地系统

电路原理如图 1-2-3 所示。

L 为消弧线圈, 其特性呈感性。等值电路如图 1-2-4 所示。

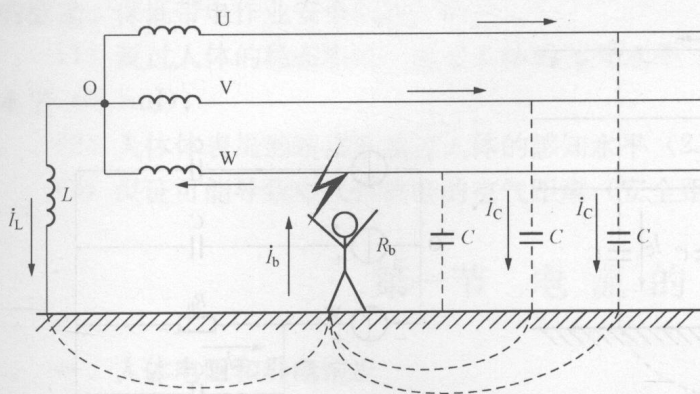


图 1-2-3 中性点经消弧线圈接地系统发生单相触电原理图

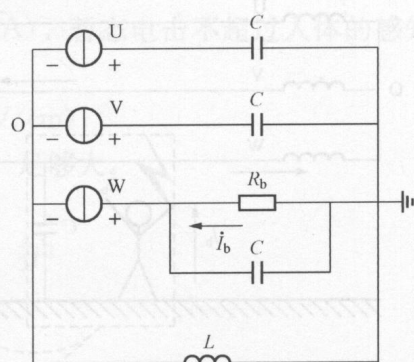


图 1-2-4 中性点经消弧线圈接地系统发生单相触电等值电路图

根据节点电压法, 可得

$$\dot{U}_O = \frac{-\frac{\dot{U}_U}{Z_c} - \frac{\dot{U}_V}{Z_c} - \frac{\dot{U}_W}{R_b // Z_c}}{\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{R_b // Z_c} + \frac{1}{Z_L}} = \frac{\dot{U}_W \cdot Z_L (R_b // Z_c - Z_c)}{(R_b // Z_c)(2Z_L + Z_c) + Z_c Z_L}$$

所以人体触电电流为

$$\dot{I}_b = \frac{-\dot{U}_W - \dot{U}_O}{R_b} = -\frac{\dot{U}_W}{R_b} \left(\frac{1 - 3\omega^2 LC + j \frac{\omega L}{R_b} (R_b^2 - 1)}{1 - 3\omega^2 LC + j \omega L R_b} \right)$$

当消弧线圈的 $X_L = \frac{1}{3} X_c$ 即 $L = \frac{1}{3\omega^2 C}$ 时 (消弧线圈采用全补偿方式, 系统处于谐振状态, 不采用), 通过人体的触电电流等于 0。但由于中性点经消弧线圈接地系统, 消弧线圈的补偿方式通常采用过补偿方式, 且在发生单相金属性接地时其补偿后的接地点处电流要求小于 10A, 所以发生人身单相触电经过人体电阻后, 触电电流比 10A 小。

3. 中性点经低阻抗接地系统

此种系统的中性点接地经过的低阻抗元件阻抗很小, 与人体电阻相比可以忽略, 当发生单相触电时, 可以当作中性点直接接地系统来处理, 流过人体的电流为

$$I_b = \frac{U_{Nph}}{R_b} = \frac{10\,000 / \sqrt{3}}{1500} \approx 3.85(\text{A})$$

(二) 两相触电

人体同时与两相导线接触时, 电流就由一相导线通过人体流至另一相导线。两相触电不论电网是否中性点接地, 也不论人体与大地是否绝缘, 触电的情形都一样。

两相触电时, 通过人体的电流为

$$I_b = \frac{U_N}{R_b}$$

例如: 在 10kV 线路上发生两相触电, 人体电阻为 1500Ω, 流过人体的电流为

$$I_b = \frac{U_N}{R_b} = \frac{10\,000}{1500} = 6.67(\text{A})$$

三、人体的安全电流

触电时, 人体受害程度决定于通过人体的电流即电击。电击一般分为稳态电击和暂态电击(暂态电击的内容可参见本章第二节的相关内容)。稳态电击电流的持续时间较长, 频率与电网频率基本一致。表 1-2-1 列出了稳态电击下人体表现的特征。

表 1-2-1 稳态电击下人体表现的特征

电流范围 (mA)	50~60Hz 交流电	直 流 电
0.6~1.5	手指开始感觉麻	没有感觉
2~3	手指感觉强烈麻	没有感觉
5~7	手指感觉肌肉痉挛	感到灼伤和刺痛
8~10	手指关节和手掌感觉痛, 手已难于脱离电源, 但仍能摆脱	灼热增加
20~25	手指感觉剧痛, 迅速麻痹, 不能摆脱电源, 呼吸困难	灼热更增, 手的肌肉开始痉挛
50~80	呼吸麻痹, 心房开始震颤	强烈灼痛, 手的肌肉痉挛, 呼吸困难
90~100	呼吸麻痹, 持续 3s 或更长时间后心脏麻痹或心房停止跳动	呼吸麻痹

当不同数值电流作用到人体的神经系统时, 由于神经系统对电流的敏感性很强, 人体将表现出不同的反应特征, 并且交流电流比直流电流对人体的危害更严重。触电伤害的程度跟以下几个因素有关。

1. 电流大小

电流是触电伤害的直接因素, 电流越大, 伤害越严重。一般通过人体的交流电流(50Hz) 超过 10mA (男性约 13.7mA、女性约 10.6mA), 直流电流超过 50mA 时, 触电人就不容易自己脱离电源了。

2. 电压高低

因为作用于人体的电压越高, 可能造成人体皮肤的首先击穿, 人体电阻会急剧下降, 使通过人体的电流大为增加, 所以电压越高越危险。

3. 人体电阻

人体电阻主要决定于皮肤的角质层。皮肤完好、干燥时电阻大, 如果皮肤破损或大量出汗或受到电击, 人体电阻会显著降低, 使通过人体的电流急剧增大。

4. 电流通过人体的途径

电流通过人体的路径不同，使人体出现的生理反应及对人体的伤害程度是不同的。电流路径与流经心脏的电流的比例关系见表 1-2-2。左手至脚的电流途径，由于其流经心脏的电流与通过人体总电流的比例最大，因而是最危险的；右手至脚的电流路径的危险性相对较小。电流从左脚至右脚这一电流路径危险性最小，但人体可能因痉挛而摔倒，导致电流通过全身或发生二次触电而产生严重后果。

表 1-2-2 电流路径与流经心脏的电流的比例关系

电 流 途 径	左手至脚	右手至脚	左手至右手	左脚至右脚
流经心脏的电流与通过人体总电流的比例 (%)	6.4	3.7	3.3	0.4

5. 触电的时间长短

触电时间越长越危险。有时虽然触电的电流只有 20~30mA，但由于触电时间长，电流通过心脏，造成心脏颤动，直至心脏停止跳动。一般认为触电电流的毫安数乘以触电时间的秒数超过 50mA·s，人就有生命危险，所以触电时迅速脱离电源最为重要。

6. 人的精神状态

人的生理和精神状态好坏对触电后果也有影响。心脏病、内分泌失调病、肺病等患者触电比较危险；酒醉、疲劳过度、出汗过多等，也往往会促成触电事故的发生和增加触电伤害程度。

根据表 1-2-1，电流很小时（如在 0.6mA 以下），人体都感觉不到。50Hz 交流电流 10mA 以下，直流电流 50mA 以下，虽然使人有麻电、热、痛的感觉，但是对人还没有别的伤害，并且有可能自己脱离电源。但大于上述数值的电流就很危险了。所以一般安全技术规定 50Hz 交流电流 10mA 和直流电流 50mA 为人体的安全电流。

电流对人体的伤害不仅与电流的大小有关，还与电流流经人体的时间有关，时间越长，伤害越大。如家庭剩余电流动作保护装置的动作电流为 30mA，动作时间小于等于 0.1s。但带电作业是高危作业，作业中作业人员长时间接触带电体，人体安全电流的取值比一般规定要小得多，为 1mA。另外，1mA 也是衡量带电作业绝缘工具好坏的物理量。

四、防止人身触电的原理

触电时通过人体的电流与加在人体上的电压成正比，与回路阻抗成反比。如果在触电回路中，作用于人体的电压极小或回路阻抗极大，那么流过人体的电流就会很小。当通过人体的电流小于带电作业安全电流时，就能保证带电作业人员不会遭到触电伤害。因此，可以从以下两方面降低带电作业时通过作业人员的电流。

1. 减少作用于人体的电压

带电作业时退出线路重合闸，以及禁止在有雷电情况下进行带电作业等措施，均是为了避免带电作业中过电压（前者为开关连续开断、合闸而产生的操作过电压，后者为大气过电压）对带电作业的安全造成影响。

2. 增大触电回路的阻抗

在 10kV 中性点不接地系统中，运行人员穿戴绝缘手套并使用绝缘性能良好的绝缘操作杆，站在地面或电杆上操作高压跌落式熔断器熔丝时，由于绝缘手套和绝缘操作杆的绝缘电阻增大了“带电体—人体—大地”这个触电回路的阻抗，有效限制了触电电流。假设操作杆