

电气装置的保护接地

苏联M. P. 乃費利德著

電力工業出版社



內 容 提 要

本書从保証有可能触及电气裝置的人員的安全方面来討論与各种系統網絡中的載流部分接地有关的主要物理概念。書中列出了有关接地的裝設及其运行的知識，概述了接地裝置的試驗。此外，还研討了保証接地短路时安全的其他一些措施。

本書可供从事电气裝置的設計、安裝和运行的工程师、技術員和工人参考。

М. Р. НАЙФЕЛЬД
ЗАЩИТНЫЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1956

电气裝置的保护接地

根据苏联国立动力出版社1956年莫斯科版翻譯

*

792D292

电力工業出版社出版(北京复兴門外駐金橋)

北京市書刊出版業營業證可證出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

*

787 × 1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 4 $\frac{7}{8}$ 印張 * 108千字

1958年4月北京第1版

1958年4月北京第1次印刷(0001—5,600册)

統一書号: 15036·676 定价(第10类)0.70元

原 序

維護电气裝置的人員或与其接觸的人員的安全，大部分決定于接地裝置的正確裝設和運行。

本書的目的是提供廣大的電業人員能理解關於保護接地的物理基本概念，計算和裝設接地以及運行條件的知識，試驗和測量保護接地的知識。

由於本書的篇幅不大，在書中只能列出實際工作中必需的最主要的知識，且極扼要地加以敘述。

因此，在書中未討論過電壓保護的接地（關於這方面的知識在專門的文獻中有敘述）以及接地裝置的安裝問題。

編寫本書時所根據的資料是蘇聯現行“电气裝置安裝規程”、新“規程”^①草案、文獻中現有的關於接地問題的資料以及作者在实际裝設接地的許多問題方面的著作。

此外，還參考了多年來寄到電站部的關於應用“安裝規程”方面的許多質疑信件。

在編寫§2、4、7、13、18和26時，利用了作者與技術科學碩士Л. П. 波多里斯基在起草“安裝規程說明”（1950年）時所共同編寫的資料的一部分，該資料由於修改“規程”而未發表。

作者感謝技術科學博士Л. Е. 厄賓教授和技術科學博士А. В. 涅夫施爾教授，因為前者在審閱手稿時提出了許多意

① 指“电气裝置安裝規程”而言。——編者

見，后者对有关地中电流的某些章节提供了試驗和理論檢查的帮助。

作者希望本書能对从事电气裝置的設計、安裝和运行的工程师、技术員和工人有帮助。

对本書的所有意見和希望請寄至：莫斯科水閘河岸街10号国立动力出版社(Госэнергоиздат：Москва，Шлюзовая набережная, 10)。

作 者

目 录

原序

第一章 基本概念	5
1. 触电的危险性	5
2. 防护触电的主要措施	10
3. 各种系统的网络中的接地短路电流	15
4. 接地装置的电阻	18
5. 跨步电压和接触电压	20
第二章 接地体	28
6. 土壤的电阻系数	28
7. 天然接地体	33
8. 人工接地体	36
9. 屏蔽现象	41
10. 放射式接地体	46
11. 接地体的热稳定	47
12. 洩放雷电流的接地体	47
第三章 各种系统的网络中的接地	48
13. 高压和低压网络中中性点的状态	48
14. 作为安全措施的接地	53
15. 1000 伏以上的小接地短路电流装置中的接地	57
16. 1000 伏以下的中性点不接地的装置中的接地	59
17. 大接地短路电流装置中的接地	60
18. 1000 伏以下中性点直接接地的装置中的接地(接零)	62
第四章 接地的装设	80
19. 各种电压和各种用途的接地间的连系	80

20. 应当接地的設備	86
21. 接地导体	89
22. 选择中性点接地的低压網絡中的接零导体的特点	94
23. 接地导体的接合和連接	102
24. 接地計算	107
第五章 保护切断	111
第六章 特殊条件下的接地的裝設	118
25. 架空綫路的桿塔和設備的接地	118
26. 直流裝置中的接地	122
✓ 27. 有爆炸危險房屋內的接地	123
28. 导电不良的土壤中的接地	125
29. 携帶式用电設備的接地	129
30. 移动式裝置和机械的接地	130
31. 利用大地作为导綫的接地	134
第七章 接地裝置的运行和試驗	137
32. 对运行的一般要求	137
✓ 33. 接地裝置电阻的測定	141
34. 土壤电阻系数的測定	148
35. 中性点接地的低压裝置中相—零迴綫阻抗的測定	149
✓ 36. 檢查接地綫路是否完好	153
参考文献	154

第一章 基本概念

1. 触电的危险性

触电可以分为下述三种：

1)因直接接触或过分靠近带电的载流部分所引起的伤害；

2)接触因电气絕緣伤損而带电的电气装置的金屬結構部分或用电設備外壳而引起的伤害；

3)因靠近电气絕緣伤損处或载流部分接地短路处受到所謂“跨步电压”所引起的伤害。

触电的直接原因是由于电流通过人体構成电路或人体受外来的作用(例如，电弧产生的灼伤、失明等)，或者同时产生上述两种現象所引起的。

触电的性質及其后果，与身体及生理状态的許多情况有关：电流种类和大小、人体电阻、电流流經人体的途徑、电流作用于人体的時間以及触电条件、人的个性和状态（特别是触电时）。

在触电事故問題方面，生理学家、电气病理学家、触电事故研究專家和工程师們积累了大量的試驗和統計資料，并对触电事故进行了許多次調查。但是，对整个触电問題，特别是人們触电的激發作用(механизм поражения)，触电电流的大小以及在复杂的人体机构內因触电所产生的各种現象，还是研究得不够的。在这方面进行的試驗往往得出相反的結果，因为試驗是用各种动物在不同的条件下进行的。

目前关于引起触电死亡的电流大小存在不同的意見。截

至目前为止，認為 100 毫安(0.1 安)左右的电流毫無疑問是致死的电流。但是，当电流小于 100 毫安很多时(約 30—40 毫安时)也有造成死亡的情况。B. E. 馬諾依洛夫[2]^①进行許多次調查証明：当电流約为 5—10 毫安时發生过因触电而死亡的事故。但是，畢竟應該認為这种情况只有在触电条件特別不良且触电者具有某些个人特点时才發生。

在大多数情况下，由于机体的作用停止——呼吸或心臟跳动的停止以及随之而产生的机体內的生物化学过程的停止而造成死亡。严重的灼伤也可能造成死亡事故。

到目前为止，有几种理論解釋触电的激發作用。許多年来流傳着这样的意見：当电流流經人体时，浸透人体組織和充滿血管中的血液和其他流質發生电解作用[11]。此时，触电人的机体內(包括触碰交流电)所产生的極化过程对他的神經系統起强烈的刺激作用，这也是电伤的原因。

某些生理学家(B. A. 涅哥夫斯基、H. Л. 古尔維奇)認為在低电压时触电致死的基本原因是心臟产生所謂震顫現象。震顫的特点是心臟从正常收縮轉为心肌各部分無节奏地收縮，因而破坏血液压入血管中的节奏性和造成血液循环停止(在狗身上所作的試驗)。

触电的激發作用的最新論点(Г. Л. 弗廉克里、И. Р. 彼得罗夫、B. E. 馬諾依洛夫、A. Д. 卡朴蘭)是以下述理論為根据的：当驟然受电流作用时后腦頂部的兴奋和抑止过程所引起的对触电的反射作用。从这一观点来看，机体的作用停止(呼吸麻痺、心臟机能破坏)是上述过程的結果。神經系統的兴奋程度及其生理上的耐性和反射性对触电的后果有决定性

① 方括弧中的数字系指書末所列參考文獻的編號，下同。——譯者

的影响，且对不同的人有不同程度的影响，即使对同一人来说，随着他触电时的情况的不同，影响的程度也不同。

根据这一理论可以解释在相当小的电流下触电致死的原因。

在表 1 中列出了瑞士尤利赫州电業管理局对 25 个工作人员所进行的试验数据，借以大致地说明不同大小的交流电对人体的作用[11 和 9]。

电流流经人体时的现象(当手握住电极时) 表 1

电流, 毫安	生 理 现 象
0—0.9	不感觉有电流
0.9—3.5	感觉有电流, 但無疼痛现象
3.5—4.5	开始有不舒服的疼痛感觉: 手指肌肉有輕微的痙攣性的反射收缩
5—7	所有被試驗的人的手感觉刺痛, 手的肌肉輕微痙攣
8—10	整个手剧痛地痙攣性收缩; 手难于摆脱电极
11—12	肌肉痙攣性收缩, 一直收缩到肩部; 剧痛。与电极接触的时间可以不超过 30 秒钟
13—14	手能自主地贴上, 仅仅难于摆脱电极。这种状态可以忍受不超过 15 秒钟
15	手被贴上且不能摆脱电极

当电流约为 15 毫安时, 所有被試驗的人的手上出现汗滴。

在判断上述試驗时, 应考虑到下述情况: 被試驗的人是有心理准备的, 且前述触电时經常具有的偶然性因素在表中所列試驗中未包括。因此, 表 1 中所列的数据不能作为解释触电的激发作用的根据。

許多次試驗証明, 直流电对人体机构的作用較交流电厉

害^①。同时也已証明：触电的危險性随着交流頻率（每秒鐘的週期数）的增加而減少。

人体不能視為普通物理上的导体。因此，人体的电阻也不是一定的，而可能在很大範圍內变化：約由 1000（及其以下）至数万欧姆。人体的电阻隨許多条件而定，特別与接触处的皮膚狀況和电阻、接触面积的大小和接触性質（紧紧地握住或偶然接触）、所施电压值及其他因素有关。

电压本身的大小不能作为确定触电的危險程度的标准。統計表明：触电招致死亡的事故發生在各种电压下，其中也包括65伏的电压（电焊时）。大多数触电事故是在127、220和380 伏的电压下發生的。当条件特別不良时，在更低的电压下也可能發生触电事故。因此，苏联規定在条件特別不良时采用 36 伏的电压，而在特別危險的条件下（在金屬儲藏器和鍋爐等內工作时）則采用 12 伏的电压。

电压值決定触电电流的大小。电压值对皮膚，特別是皮膚表面的角質層的击穿有很大的影响。在触电的最初时刻，整个电击回路的很大部分电压落在一部分具有較大电阻的干燥皮膚上（如果皮膚未损伤的話）。結果皮膚被击穿，且随之而产生的是人体电阻大大地降低和电流增加。

周圍的条件——有無潮气、地板导电率的大小、靴鞋状态等对触电电流值有很大的影响。

电流作用的持續時間对触电程度和后果的影响也是很大的。在这方面有許多試驗数据（对动物所作的試驗）。全苏电工研究院和苏联医学科学院机体复活實驗生理研究所从对狗所作的試驗中得出了有价值的數據[26]。当利用电容器放

① 原文为：直流电对人体机構的作用較交流电为弱。——譯者

电对狗的胸廓通以 8.2—10 安以下的脈冲电流和通电時間为 0.01 秒时，不引起其心臟功能的破坏。若对同一狗通以 11.1—12.7 安以下的脈冲电流，但通电時間为 0.002—0.003 秒时，也不引起其心臟功能的破坏(在这两种情况下都是用放电時間內的振幅电流值进行試驗的)。

触电伤害的程度也与电流通过人体的途徑有关：通过軀干、手再回到軀干(此时电流通过左手較通过右手危險，因为左手的神經末端是与心臟的活动相連系的)，由手至脚，經過兩脚。电流通过兩脚时的危險性較小，因为此时不管其他原因如何，在电流的最短途徑上沒有最重要的器官——心臟和腦。

在触电的許多情況下可能發生所謂“假死”現象——仅仅因机能麻痺而引起失掉生命象征，且在触电后的一定時間內采用人工呼吸方法即可恢复心臟和肺部的活动。目前正在研究(对动物做試驗)使触电者复活的其他方法[26]，特别是利用短时通以較大值的高压冲击电流使触电者复活的方法。但是，这些方法暂时还無实用意义。

在触电事故問題方面的各种不同見解，对規定出保証接触电气裝置的人們安全的一定标准絕無妨碍。这些标准系以多次試驗为根据，因此，是完全正确的。自然，根据触电事故的結果对触电事故問題的进一步研究，可能要求將“規程”^①的某些条例也作相应的修改。

① 此处及以下所簡称的“規程”系指現行“电气裝置安裝規程”的“电气裝置的接地”篇及对 1950 年版“規程”所作的补充部分，电站部技术司、电站部国家工业动力和动力监察局及冶金和化学工业建設部电气安裝总局共同制訂。凡是提及的地方都考慮到新“規程”草案。

2. 防护触电的主要措施

圖 1 所示者为中性点不接地的三相电流網絡。該網絡的对地絕緣的每一导体經過流入地中的漏洩电流途徑上的电导与地相連，而电导是根据导体对地絕緣的导电率确定的。此外，导体对地具有电容，即与地有电容耦合。在这种情况下，任何三相电流網絡的导納可視為一个星形接綫的用电設備，通常此种导納是不对称的，因为各相对地的导电率可能不相等。只有在电阻相等，即 $r_1=r_2=r_3$ 和 $x_1=x_2=x_3$ 时，有效电流和电容电流的几何和才等于零。

在后一情况下，矢量 OA 、 OC 和 OB (圖 2, a)，即各相的对地电压(中性点 O) 在数值上是彼此相等的。当其中一相对地的导电率增加时，例如，当 A 相的絕緣破坏时，該相对地的电压降低，而其他兩相的对地电压則增加 (圖 2, b)。于是入地的有效电流和电容电流的几何和便不等于零，且將有一定值的合成电流通过絕緣损伤处。最后，当三相中有一相的絕緣完全破坏时 (A 相，圖 2, b)，該相將具有大地电位，或接近于大地的电位，于是完好的其他兩相的对地电压增加到綫电压(矢量 AC 和 AB)，而中性点的电压則增加到相电压。由

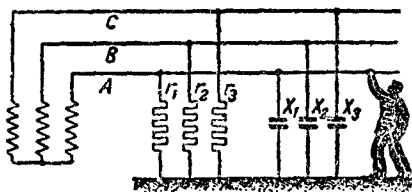


圖 1 中性点不接地的三相电流網絡系統圖

此可知，当有中性綫时，此中性綫随着網絡各相的絕緣狀況的不同，將具有由零至相电压的对地电压。由于损伤的 A 相对地的电压等于零或接近于零，所以

該相的漏洩电流和电容电流实际上將不流入地中，而有等于

兩相的有效漏洩電流和電容電流幾何和的電流經過絕緣損傷處(圖3)。

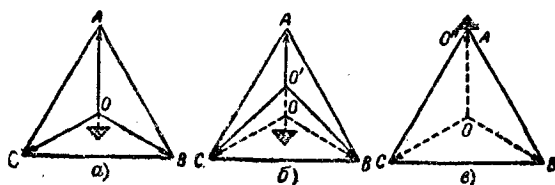


圖 2 中性點不接地的三相電流網絡的電壓矢量圖
a—所有三相的絕緣正常時；b—A相的絕緣性能降低時；
c—A相接地短路時。

由於絕緣破壞，電氣裝置的帶電部分與接地的結構部分，或直接和大地發生電氣連接，稱為單相接地短路；而此時經過接地短路處所產生的電流則稱為單相接地短路電流。

從圖1和圖3及圖2的矢量圖上可以看出，在所研究的一切情況下，綫電壓保持不變。還應指出，當所有三相的絕緣損傷程度相同時，網絡的對稱性將

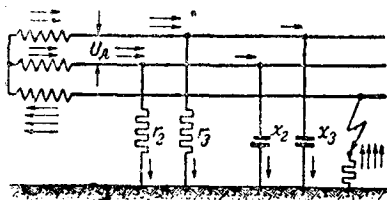


圖 3 中性點不接地的網絡的接地短路狀態

不招致破壞，因為此時電阻 r_1 、 r_2 和 r_3 以及電抗 x_1 、 x_2 和 x_3 都分別相等。

人如同網絡的導體一樣，是經過某一電阻與地相連的(圖1)，此電阻為經過人體、靴鞋、地板、建築物等流入地中的電流途徑的電阻總和。因此，人每次與帶電的導體或因絕緣損傷而帶電的接地結構相接觸，將構成經過人體、大地、電導和與大地的電容耦合的電路。此時，在這樣的電路中將

出現網絡的綫电压。

如果網絡的中性点經過相当小的电阻接地(圖4)，則各相的对地电压实际上是恒定的。当三相中一相的絕緣破坏时，中性点仅發生極小的位移。

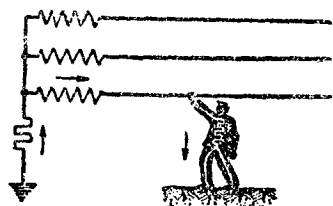


圖4 中性点接地的三相电流網絡的系統圖

人接触帶电的导体时，構成經過人体、大地、中性点接地綫的触电电路。此时，在这样的触电电路中將出現網絡的相电压。

統計表明：因直接接触載流部分和过分靠近高压載流部分而触电是最經常發生的事故。

大家知道，大多数触电事故是在 380 和 220 伏的裝置上發生的。因此，用圍柵把載流部分可靠地維護起来可以減少触电事故。但是，大家知道，这一措施的应用范围畢竟是有限的，因为維護电气裝置的人員总是要在一定範圍內靠近載流部分的。这些維護人員違反安全規程也是造成触电事故的主要原因。由此可知，在減少触电事故方面最重要的措施是严格遵守安全規程和电气裝置技术管理規程。

接触由于絕緣損伤而帶电的結構或外壳所引起的触电，可用裝設接地的方法来防止。

为了保証安全而裝設的接地，是將在正常情況下不帶电的电气裝置金屬部分与大地人为的連接。可以利用具有一定电阻 R_0 (參閱 §4) 的接地导体和“接地体”(圖5)与大地連接。

从圖5上可以看出，接触帶电的电动机外壳的人，与外壳和大地間的一段上的接地电路是并联的。保护接地的用途

是在被保护裝置的金属結構或外壳与大地間建立电气連接，此电气連接綫的电阻小到这样的程度：当帶电的导体与裝置的接地部分短路时，人与該电路并联不致有危及生命或健康的电流流經人体。

在中性点不接地的所有網絡中以及中性点接地的1000伏以上的網絡中都采用这种接地方式。在后一情况下，与裝設接地的同时，还采用在繼电保护作用下迅速切断故障綫段的裝置。此时有單相短路电流流入地中。

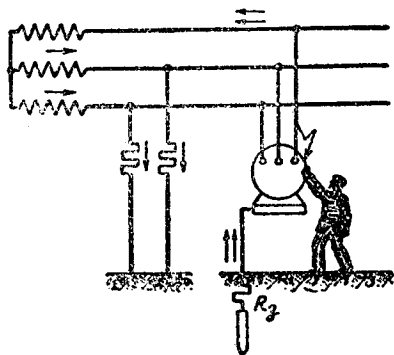


圖 5 电气设备的接地

在有中性点接地的变压器或发电机的低压裝置中，采用接地导体与接地的中性点相連的接地系統(圖 6)。实行这种連接后，可以使裝置的載流部分与裝置的接地部分的接閉变为短路，因此，用自动开关或保險器即可切断故障綫段。此时，不允許將接地短路电流导入地中。这种接地系統称为接零。

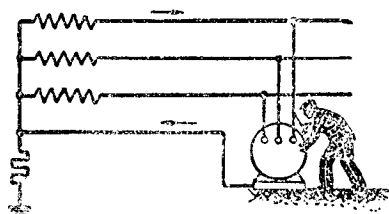


圖 6 中性点接地的網絡上的电气设备的接地(接零)

短路时保證切断該段網絡。

由于接零是接地方式之一，所以下面采用統一的術語“接地”。接地系統簡称的術語“接零”，只有在中性点接

地的情况下論述到接地的裝設特点时才采用①。

由此可知，裝設保护接地的目的是：1)在中性点不接地的裝置中——在網絡的一相与接地部分短路时保証流过人体的电流在安全值以內；2)在中性点接地的裝置中——在網絡的一相与接地部分短路时保証能自动切断網絡的故障段。

良好地裝設的接地实际上能完全避免因导体与接地部分短路而發生的人身触电事故，反之，接地不良將發生触电事故。根据 В. И. 科罗里科娃長时期地分析触电事故所得出的数据(全苏科学研究所电工技术协会所公布的 1949—1953 年所召开的“电气安全代表會議訓練班資料集”)，在所有触电事故中，平均有 2.3% 是由于电气裝置沒有接地或接地不良而發生的②。

当載流部分与裝置的接地部分短路时，因产生跨步电压而引起的触电，用适当地裝設接地裝置的方法可以防止（參閱后面的敘述）。

在个别情况下，可以采取基于下述原理的保护措施：

1. 保护切断。其用途与接零的用途相同，因設備的外壳上产生对地电压时它应立即切断故障綫段。为此，在外壳与大地間接一繼电器綫圈。当与外壳短路时繼电器的綫圈中通过电流，于是繼电器便作用于切断該裝置的保护开关。若在 1000 伏以下的裝置中很难使用接地以保証安全，例如，往很远的用电設備或往接地裝置补充裝設大截面的接地干綫有困难时，也可采用保护切断。

① 在新的“規程”草案中不采用“接零”这一术语。

② 在美国的工業裝置中，根据不完全的統計資料，1951 年由于保护接地不良而發生的人身事故共有 1710 起，其中 14 起造成死亡(Electrical Engineering, 1954, №3)。

2. 有人在其上工作的結構与地絕緣。这一措施的应用范围有限(只能采用供进行修理工作的絕緣台, 水銀整流器的操作台等)。

3. 根据环境条件和用电設備的用途, 采用等于 12 或 36 伏的小电压。

在所有情况下, 防止接地短路和因接地短路而产生的触电危險最重要的措施, 是根据“技术管理規程”定期檢查和試驗电气裝置的絕緣, 以保持絕緣良好。

3. 各种系統的網絡中的接地短路电流

如前所述(參閱 §2), 产生單相接地短路电流的原因是統称为“單相接地短路”的那种短路。下面將这些短路分为两种: 1) 与裝置的接地部分短路, 这种短路称为“碰壳短路”; 2) 直接与地短路或与未接地部分短路。將二者区别开具有重要意义, 因为在后一情况下, 在短路点有較大的接触电阻。

接地短路电流值(I_s)与許多条件有关, 首先是与網絡系統、網絡容量和長度、短路地点和短路电路的阻抗有关。

現在我們来討論各种系統的網絡中可能有的接地短路电流值。

根据“規程”的分类, 1000 伏以上的电气裝置分为有大接地短路电流(短路电流超过 500 安)的裝置和有小接地短路电流(短路电流等于或小于 500 安)的裝置。实际上, 網絡中有直接接地或經過小电阻接地的中性点的 1000 伏以上的裝置属于第一种情形; 而所有中性点不接地的 1000 伏以上的裝置則属于第二种情形。

在中性点不接地的三相电流網絡中, 如前所述, 其單相接地短路电流为有效电流和电容接地电流的几何总和。在