

煤矿井下低压电网 漏電保护

錢树功 赵跃昌著

不 移出室外

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本書論述煤矿井下低电压網漏電保护的任務、方法，介紹現有的漏電保护設備，目前尚存在問題，以及改善途徑。

本書比較着重地闡述了井下低电压網路所应用的360伏，127伏，以及360伏漏電繼電器的構造、原理、使用。

書的最後一節介紹苏联和波兰矿山机电人員对矿井采区電網选择性接地保护的研究。

本書供广大从事矿山繼電保护的机电人員参考。

1449

煤矿井下低电压電網漏電保护

錢樹功 赵跃昌編

*

煤炭工业出版社出版(社址：北京东长安街煤炭工业部)

北京市書刊出版业營業許可証出字第084号

煤炭工业出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

开本 787×1092 毫米 $\frac{1}{32}$ 印张 $3\frac{3}{4}$ 字数 73,000

1960年3月北京第1版 1960年3月北京第1次印刷

統一書号：15035·1034 印数：0,001—3,000册 定价：0.50元

在井下低电压电气设备事故中，有很大一部分是漏电事故，恶性的漏电事故可能造成火灾、瓦斯爆炸和人身触电。所以，现在煤矿井下采用了各种漏电保护装置。当網路绝缘电阻降低和可能发生漏电事故时，断开網路和发出警报信号，这是减少和预防漏电事故的有效措施。它对提高生产、保证安全有重大的意义。

应当指出，随着煤矿生产的飞跃发展，矿井的安全措施也在不断地完善，保安设备也不断地增加。新建矿井中都采用了较完善的漏电保护装置，旧矿井也在积极增添漏电保护设备，以改进安全状况。

随着漏电保护在我国的应用和推广，煤矿机电工作人员不仅熟练地掌握了漏电保护设备的原理、安装、运行和检查，而且也积累了不少经验。但就编者所知，目前我国关于漏电保护方面的专门书籍还极少，因此，我们根据过去在工作中所积累的資料和初步試驗研究結果，在工作之余写出了“煤矿井下低电压網路漏电保护”一書。

書中包括：触电理論、漏电保护任务与方法、漏电保护设备和改善漏电保护的途径。此外，对井下低电压網路所应用的660伏、380伏和127伏漏电繼电器的构造、原理、使用和维护分別作了較詳細的說明。本書仅供煤矿机电工程技术人員，井下机电工人参考。如果此書对讀者能有所帮助，这将是編者最大的愉快。

由于編者水平較低，錯誤之处在所难免，希望广大讀者批評指正，我們表示衷心的感謝。

編者 錢樹功、趙耀昌

目 录

序

第一章 电流伤人的危险和预防方法	3
§1—1. 电流对人的作用	3
§1—2. 电流对人身组织作用的决定因素	5
§1—3. 三相低压设备运行安全条件	10
第二章 漏电保护的任務和方法	19
§2—1 漏电保护的任務	19
§2—2 漏电保护的方法	21
第三章 煤矿井下低压电网的漏电保护	24
§3—1 煤矿井下低压电网的供电概况	24
§3—2 660伏电网的漏电保护	25
§3—3 380伏电网的漏电保护	36
§3—4 127伏电网电保护	46
§3—5 无瓦斯煤尘爆炸危险的矿井电缆网路的漏电保护	58
§3—6 电容补偿	66
§3—7 漏电继电器的安装	72
§3—8 漏电继电器的运行	77
第四章 漏电保护的改善	85
§4—1 PYB—2型漏电保护装置の改善	85
§4—2 矿山采区电网选择性的接地保护	99

第一章 电流伤人的危险和预防方法

§ 1—1. 电流对人的作用

电流对人身各个部分、各个器官都有作用，这些作用以各种各样的形式表现出来。电流伤人，按对人损伤的部位，可大致分为两类——触电和电外伤。触电是伤害人身的内部器官（呼吸器官、心脏器官和神经系统），电伤是伤害身体的外部（烧伤、伤害四肢和其他等），在实际中内部器官和外部组织往往同时被伤害。

在电流伤人之中最危险的是触电，在多数情况下触电使人致死。造成触电的原因：1) 经人身流过小电流（0.025—0.1a）；2) 作用于人身上较大的电压（60伏以上）；3) 流过电流时间较长（大于一秒）。各个学者对触电现象的解释是不同的。研究资料说明，触电致死的主要原因是呼吸麻痹。由呼吸麻痹和心脏麻痹同时致死的情况较少，仅由心脏麻痹致死的情况更少。

电外伤包括三种形式：1) 烧伤；2) 电烙印；3) 皮肤电镀金属。

电流直接通过人身，或者不直接通过人身，都可能发生烧伤。当电流经人身通过时，电弧烧伤是最利害的。这样的伤害发生在高压网路中（35~220千伏和6~10千伏的大电容网路）。当人接近高压载流导体的距离小于和等于放电距离时，在载流导体和人身之间发生电弧。该电弧经过人身，短接电流回路，经过人身流过大的电流（若干安

培)，此电流在人身中能引起瞬时大的反应。经过人身短时流过大的电流不引起触电，但引起严重的、往往是致死的烧伤。

电烧伤的因素是：1)高电压；2)大电流(几安培)；3)电流经人身瞬时流过(一秒以内)。

在高压回路中，电流不通过人身时的大电弧也能引起触电，例如在负荷下开断空气断路器时的电弧。

被保险丝和载流导体电弧烧化的飞散金属质点、接触电气设备发热部分和1000伏以下網路电弧所引起的烧伤是比较轻微的(如果不损害眼睛)。

电烙印是一种病症，他的性质到目前还没有较完善的说明。电烙印的病状是：在皮肤上有圆形或者椭圆形的肿胀；受伤部分的皮肤像脚趼的形式硬化，并呈现卵黄色的光栏或者卵黄絮——硫黄花纹；硬化的边缘高起，中间部分是深陷的或者凹入的，深陷的底部和边缘为深灰色，淡红色少见。还没有看到电烙印发红、发淡和化脓的情况。

不管电烙印是瞬时出现，还是在复原的过程中，它的特点是不会危及生命。通常电烙印过一些时候就会无痛消失。经常发生的是有一般烙印特性的破坏大部分身体的极大的电流伤害。不管伤害多深，直到骨头，这种伤害会是无痛地过去。

电镀金属是皮肤表面被熔化成为气体状态的金属质点浸润。皮肤的这一部分是高低不平而且表面坚硬，受难者感到有压力，好象不是自己身体的一部分。该症状的后果，如烧伤一样，根据受伤皮肤的表面积确定。

电外伤的主要情况如上所述。就这种情况来说，无论电外伤多么沉重，通常很少对人有生命危险。

主要的危险，是破坏人身内部组织的触电。

§ 1—2. 电流对人身组织作用的决定因素

电流对人身组织的破坏作用由许多因素决定。经人身体流过的电流值是电流对人组织作用的主要因素。电流值由人身电阻和作用到人身上的电压（接触电压）决定。流过人身的电流值等于

$$I_q = \frac{u_{np}}{R_q}, \quad (1)$$

式中 u_{np} ——接触电压(伏)；

R_q ——人身电阻(欧)。

表 1

电流(毫安)	作用症状	
	交流50—60赫	直 流
0.6—1.5	开始感觉到、手指轻微振动	没有感觉
2—3	手指振动利害	没有感觉
5—7	手抽筋	痒，感觉发热
8—10	手指、手关节和手腕痛的利害。 虽能脱离导体，但困难	发热加重
20—25	手立即麻木：不能脱离导体、痛的利害，呼吸困难	发热更加重，手肌肉稍有收缩
50—80	呼吸麻痺，开始心跳	感觉强烈发热，手肌肉收缩，抽筋，呼吸困难
90—100	呼吸麻痺，持续时间大于和等于三秒时，心臟麻痺，停止跳动	呼吸麻痺

电流对人身組織作用,也决定于电流的种类,頻率、路径和作用時間等。下面簡述各种因素对人身組織的作用。

1. 电 流 值

根据多次实验和不幸事故的分析,确定出电流值与它对人身作用的关系。这个关系如表 1 所示。

由表 1 数据可見,交流电流20~25毫安时,对人生命是危险的,而电流大于50毫安时是致死的。表1数据表明,人組織对电流是敏感的,在不大的电流下就能发生触电事故。

2. 人 身 电 阻

在低压情况下,經人身流过的电流值由人身电阻值决定,該电阻变化范围很大。多次試驗証明,它可以在100000到600欧姆中間变动。

厚度0.005~0.2毫米的表面皮肤层电阻最大,它是不完善的电介質。当皮肤角質层完整时,人身电阻由这层电阻值决定;在皮肤干燥和未受損害时,人身电阻值可达10000~100000欧姆。当角質层破坏时降低到800~1000欧姆,而当沒有皮肤时,則降低到600~800欧姆。

皮肤的电阻值也是变化的,它根据皮肤的状况,通过电流的持續時間和接触电压值,在很大的范围内变动。当皮肤潮湿时,其电阻值急遽降低。

在小电压下皮肤的电阻和接触面积成反比。1平方厘米皮肤的电阻平均值大約是8000欧姆。

在接触压力（导体对皮肤的压力）增加时，人身电阻值降低。但这个现象仅在压力小于1公斤/平方厘米时，才明显地表示出来。随着通过人身电流的增加，皮肤电阻减少。因为电流增加皮肤发热加重、汗分泌增加，从而皮肤更加潮湿。同时电阻降低也促成电流增加。

作用电压（接触电压）对人身电阻值有大的影响。接触电压增加到250伏时，人身电阻值急遽降低。当电压高于250伏时人身电阻随电压变化很小。因为当电压在250伏左右时，电流猛烈地击穿皮肤，人身电阻值减少到没有皮肤层时的电阻值。

随着电流作用时间的增长，人身电阻值减少。这可用电流击穿皮肤的增加来说明。图1为人身电阻根据接触电压的变化曲线。当电流持续时间是0.015秒，电压由120伏变到250伏时，电阻由40000欧姆减到5000欧姆；持续时间是3秒时，在同一电压变化下，电阻由15000欧姆减到2500欧姆。电压继续增加，对电阻影响不大。

当作用电流持续时间增加时，人身电阻也急遽降低。例如，在150伏电压下，作用电流持续时间是0.015秒时，人身电阻等于30000欧姆，而当持续时间是三秒时人身电阻是10000欧姆。当电压等于和大于300伏，皮肤被迅速而猛烈击穿时，作用电流的持续时间影响很小。

在多次试验和研究的基础上，规定人身的平均和极限电阻值是可能的。这些数据以曲线的形式画在图2中。适于在矿山设备附近工作的人身电阻值可按等于800~1500欧姆计算。

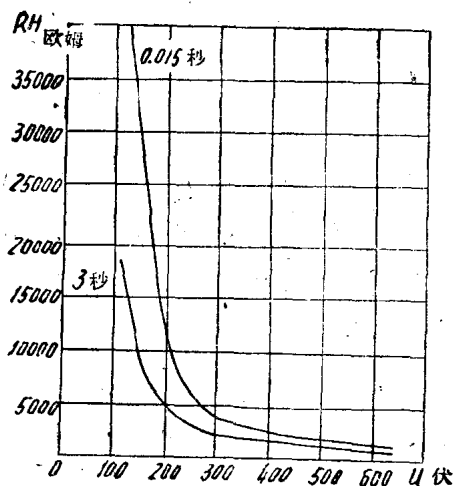


图 1 当作用持续时间0.015和0.3秒时，人身电阻与接触电压的关系曲线（电流路径是手到手，在尸体上测量的）

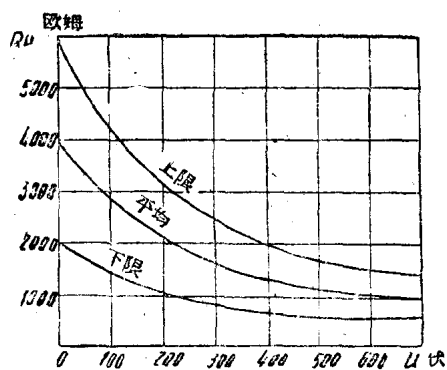


图 2 人身平均和极限电阻值

最后应当指出,人身电阻不完全是純电阻,而是电阻和容抗的总和,但由于容抗的数值很多,在实际計算中忽略。

3. 作用电流持續時間

作用电流持續時間对人身組織影响很大。首先,人身电阻值依赖于作用時間。它因电流作用時間增加而减少。作用后果的严重程度和作用時間同时增加。即使在很大的电流值下(10安培或更大的数值),电流短时作用,很少能引起心脏或者呼吸麻痺的病症。在6~110千伏設備上,电流作用時間在一秒之内时,很少見到因心脏和呼吸麻痺而致死,受难者通常仅是被烧伤。經人身流过电流時間大于一秒鐘时,就会引起呼吸或者心脏麻痺(当电流大于0.025安培时)。

4. 觸电电流路径

触电电流路径也有很大影响。通过心脏和呼吸器官的电流由电流路径决定。观测得出,电流从一个手进入由另一个手流出时,总电流的3.3%通过心脏;从左手到脚时,总电流的3.7%通过心脏;从右手到脚时,总电流的6.7%通过心脏;从一个脚到另一个脚时,总电流的0.4%通过心脏。触电危险最大的电流路径是从右手到脚,危险最小的是两脚間。

5. 允許电压

由上述可見,經人身流过的电流值由很多因素决定,

其中每一个因素又依赖于许多情况。因此，预先确定通过人身的电流值，实际上是无法解决的问题。所以，规定安全条件的界限不能以电流为标准。

关于允许电压值现在还没有统一的意见。在各个国家中应用不同的电压值。波兰、捷克和瑞士是50伏；荷兰和瑞典是24伏；法国交流是24伏，直流是50伏；苏联根据工作条件允许电压应用不同的数值，条件较好的场所是65伏，一般场所是36伏，特别危险的场所是12伏。

§ 1—3. 三相低压设备运行安全条件

在触及载流导体时，人受伤的程度取决于设备的电压、变压器中点是否接地、网络绝缘电阻和电容等。我国现在井下低在供电系统是中性点绝缘的。

人同时触及不同两相载流导体是最危险的情况，触电电流不因中性点是否接地、网络绝缘电阻和其他等等而改变。此时触电电流（经人身流过的电流）

$$I_q = \frac{\sqrt{3}u}{R_q}, \quad (2)$$

式中 u ——相电压(伏)；

R_q ——人身电阻(欧姆)。

1. 中性点绝缘低压网路

忽略网络各相对地电容的绝缘电阻等值电路图和向量图如图3所示，图中相电压是对称的，各相绝缘电阻是相同的，中性点接地，星形。此时下述关系式成立：

$$u_1 = u_2 = u_3; \quad u_0 = 0; \quad i_1 = i_2 = i_3;$$

$$u_1 = i_1 r_1; \quad u_2 = i_2 r_2; \quad u_3 = i_3 r_3;$$

式中 u_1, u_2, u_3 ——各相导体对地电压(伏);

u_0 ——电源中点对地电压(伏);

i_1, i_2, i_3 ——各相导体絕緣的漏泄电流。

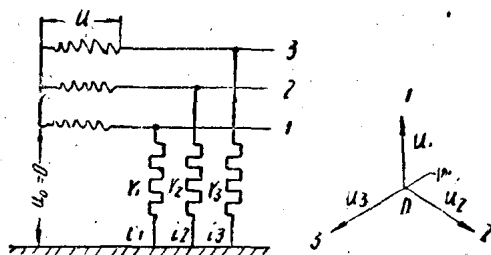


图 3 人接触一相前电路图和向量图

当人触及第一相后(图 4), 該相对地絕緣电阻

$$r'_1 = \frac{R_q r_1}{R_q + r_1}. \quad (3)$$

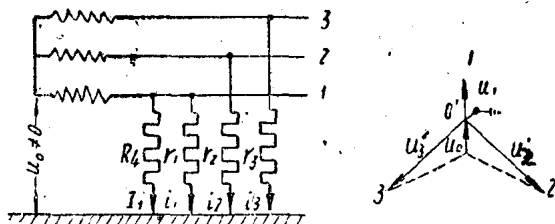


图 4 人接触一相后电路图和向量图

此时綫路对称性被破坏, 第一相对地电压减少, 第二相、第三相对地电压增加。絕緣电阻負載中点偏移, 电源

中点对地电压大于零。根据新的網路，可以写出下列关系式：

$$\begin{aligned} \dot{u}'_1 &= \dot{u}_1 - \dot{u}_0 = i'_1 r'_1; & \dot{u}'_1 &= i_q R_q; \\ \dot{u}'_2 &= \dot{u}_2 - \dot{u}_0 = i'_2 r_2; & \dot{u}'_3 &= \dot{u}_3 - \dot{u}_0 = i'_3 r_3. \end{aligned}$$

根据克希荷夫第一定律

$$i'_1 + i'_2 + i'_3 + i_q = 0$$

或者

$$\frac{\dot{u}_1 - \dot{u}_0}{r_1} + \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_0}{r_2} + \frac{\dot{u}_3 - \dot{u}_0}{r_3} + \frac{\dot{u}_1 - \dot{u}_0}{R_q} = 0 \quad (4)$$

設 $r_1 = r_2 = r_3 = r$ ，并因 $\dot{u}_1 + \dot{u}_2 + \dot{u}_3 = 0$ ，方程式(4)可简化如下：

$$\begin{aligned} \frac{\dot{u}_1 - \dot{u}_0}{R_q} - \frac{3\dot{u}_0}{r} &= 0, \\ \dot{u}_0 &= \frac{\dot{u}_1 r}{3R_q + r}. \end{aligned} \quad (5)$$

接触电压

$$\dot{u}'_1 = \frac{3\dot{u} R_q}{3R_q + r} \quad (6)$$

$$I_q = \frac{\dot{u}'_1}{R_q} = \frac{3\dot{u}}{3R_q + r} = \frac{\dot{u}}{R_q + \frac{r}{3}} \quad (7)$$

由方程式(6)和(7)可以看出，中性点絕緣系統網路絕緣电阻对安全条件的影响，触电的危险决定于其它两相的絕緣电阻。

如果各相絕緣电阻不等，即 $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ，那么在触及

第一相时流经人身的电流

$$I_u = \frac{\sqrt{3} u r_1 \sqrt{r_2^2 + r_2 r_3 + r_3^2}}{R_u (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1) + r_1 r_2 r_3} \quad (8)$$

矿用电网在多数情况下主要是电缆网路，可以按 $r_1 = r_2 = r_3 = r$ 计算。

在图 5 中画出了当线电压为 380 伏时，在各种人身电阻值下接触电压、触电电流与网路绝缘电阻值的关系曲线。曲线按方程式 (6) 和 (7) 画出。

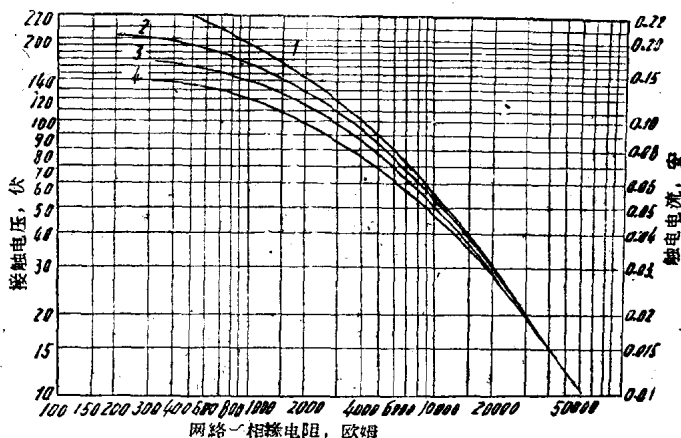


图 5 接触电压、流经人身的电流与网路电阻和人身电阻的关系曲线

1— $R_q = 800$ 欧姆；2— $R_q = 1000$ 欧姆；3— $R_q = 1200$ 欧姆；

4— $R_q = 1500$ 欧姆。

由曲线可见，在人身电阻等于 800~1500 欧姆，网路绝缘电阻小于 2500~20000 欧姆时，触电电流对人是危险的；如果网路绝缘电阻降低到 10000 欧姆或者更低，电流已经是致命的了（当没有保护接地或者保护接地

破坏时)。

在矿山中人身最大电阻值等于800~1500欧姆。图5曲线也指出,人身电阻在800~1500欧姆范围内变化对触电电流影响很小。实际上,当网络绝缘电阻 $r=10000$ 欧姆时,无论 R_0 等于800欧姆,还是等于1500欧姆,触电电流对人的生命已经是危险的了,而当电阻 $r=20000$ 欧姆时,电流不因人身电阻而改变。因此,以后作各种分析计算时,人身电阻按1000欧姆计算。这样简化了各种计算,不引起大的误差。

由上述可见,在中性点绝缘的低压系统中,流经人身的电流值,依赖于网络绝缘电阻值。当网络绝缘电阻减少时,接触电压和触电电流都增加,因而触电危险增加。

在中性点绝缘系统中,一相接地时,人触及另一相是最危险的。此时,人处于线电压之下。

2. 中性点绝缘系统中网络电容对触电电流的影响

当安全触电电流等于30毫安和人身电阻等于1000欧姆时,网络最小允许电阻值如表2所示。

表 2

网络线电压(伏)	133	231	400	525	693
网络最小绝缘电阻(欧姆)①	1000	3400	6700	9100	12300

① 表中所示绝缘电阻值是每相对地绝缘电阻值的三分之一,即网络各相对地绝缘电阻并联值,通称网络总绝缘电阻值。在漏电保护的直流系统中应用这个术语方便(见漏电保护章)。

当網路各相对地电容可以略去不計时，表 2 中所示最小絕緣电阻值在相应的电压值下是安全的。所有电气设备均具有或多或少的电容，当網路总长度增加时必须考虑網路电容对触电电流的影响。在絕緣电阻很完善的中性点絕緣系統中，触及某相导体的触电电流由網路各相对地电容决定。由鎧装電纜、胶皮電纜組成的矿井網路具有一定的电容(表 3)，它决定于電纜的构造和其长度。

表 3

导体数和截面	三相電纜电容 (微法/公里)		
	1000伏	6000伏	10000伏
3×6	0.12	0.090	0.080
3×10	0.155	0.100	0.085
3×16	0.177	0.111	0.096
3×25	0.193	0.140	0.110
3×35	0.240	0.169	0.130
3×50	0.284	0.180	0.140
3×70	0.347	0.220	0.160
3×95	0.360	0.250	0.190
3×120	0.366	0.270	0.200
3×150	0.375	0.320	0.240
3×180	0.396	0.350	0.260

初看上表，可以把高压電纜用于低压網路来降低網路电容，但是根据技术經濟指标不能采用这种作法。在短距离網路中，絕緣电阻在减少触电电流方面具有决定性的作用，在支路很多的长距离網路中，特别是 660 伏網路中，具有大的电容，絕緣电阻限制触电电流的作用降低了。

当網路每相对地电容不能忽略时，人触及網路一相时