

剩余电流保护系统

shengyu dianliu baohu xitong

及运行管理

ji yunxing guanli

李家贤 纪贤宝 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

剩余电流保护系统及 运行管理

李家贤 纪贤宝 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较系统地叙述了农村低压电网的剩余电流保护原理,实施分级保护的剩余电流保护系统的具体方法和优越性,以及各级剩余电流动作保护器的职责,同时还简述了我国剩余电流动作保护器的发展历程及其在各个时期的重要作用;对保护装置的基本电路、安装、运行管理、农网改造后保护器误动原因、常见故障处理及修理等作了全面详细的介绍。

本书通俗易懂、观点新颖、密切联系农电实际、实用性强,适合供电企业的农电管理人员、技术人员和乡村电工阅读;也可供从事剩余电流保护装置研究、生产与管理的工程技术人员参考;同时可作为农电培训教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

剩余电流保护系统及运行管理/李家贤,纪贤宝编著.-北京:中国水利水电出版社,2002

ISBN 7-5084-0976-0

I.剩… II.①李…②纪… III.零区电流-电流继电器 IV.TM588.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第005439号

书 名	剩余电流保护系统及运行管理
作 者	李家贤 纪贤宝 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排版、印刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 9.75印张 288千字
版 次	2002年2月第一版 2002年2月北京第一次印刷
印 数	00001—13000册
定 价	22.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着全国各地农网改造与建设工程的竣工,农村电能质量得到了提高,同网同价的逐步实施,使得农村的用电量大幅度上升,农民得到了实惠。但是农村低压电网的剩余电流保护系统如何兼顾农村的安全用电与农村供电的可靠性,目前仍是农电管理工作当务之急,是迫切需要解决的重要课题。

我国广大农村大力推广使用剩余电流动作保护器(原称:电流型触电保安器、漏电保护器)20余年来,不论哪个时期的产品都为农村安全用电、降低触电伤亡事故起到了不可磨灭的作用。但是由于20世纪80年代至90年代中期,农村用电量较少,又因为计划用电时期,农村被经常拉电,所以农电用户对供电可靠性的要求这一矛盾并不突出。到了20世纪90年代中后期,电能储备容量的增加,各种家用电器的飞速发展,使农村用电量大幅度上升,特别是网改后有些地区农村用电量的年增长率超过40%。农网改造中的剩余电流保护系统因总保护器选型不当、加上剩余电流保护组合装置自身退出运行较难,所以农网改造后剩余电流总保护器的频繁动作,是农电管理工作中最为头疼的问题,也是广大农电用户反响最强烈、意见最大的问题。

剩余电流动作保护器在我国已走过了地方自发、政府引导,国家制订“标准”和“规程”,规范生产和使用,健康发展等四个阶段。通过农网改造的再次实践,剩余电流保护系统必须有一个明确的配置方式。

本书作者从事剩余电流动作保护器20余年的研究与实践,根据广大农电管理人员的要求,以及对有关剩余电流动作保护器的《国标》、《行标》的学习和理解,深深体会到要彻底解决农村安全用电和农村供电可靠性的矛盾,剩余电流保护系统必须实施分级保护——即具有动作电流和动作时间级差配合的保护系统。分级保护是农村低压电网的最佳保护方式,也是最终的保护方式。

本书在编写过程中主要参考了GB6829—95《剩余电流动作保护器的一般要求》、GB13955—92《漏电保护器安装和运行》、DL/T499—2001《农村低压电力技术规程》和DL/T736—2000《剩余电流动作保护器农村安装运行规程》。

本书的读者对象主要是农电管理人员、工程技术人员以及广大农村电工,所以我们在本书的编写过程中对基本理论的分析力求做到深入浅出、通俗易懂;对保护装置的电路、安装以及广大农电管理人员很感兴趣的常见故障处理、频繁动作原因及产品的修理作了详细介绍。相信广大读者一定对这些内容很感兴趣。

四年前，作者就受江苏省电机工程学会有关部门领导的指示，要求广泛收集相关厂家的剩余电流动作保护器的资料，汇集后编著此书，但未能如愿。有的厂家一直无回音，有的厂家则是将10年前的产品或已不再生产的过时图纸寄来，因此本书的最大不足，就是所列举实例的厂家产品单一，在此深表遗憾。

本书由李家贤、纪贤宝同志编写，纪贤宝同志绘制了全书插图，最后由李家贤同志定稿。

本书编写过程中得到了江苏省电力公司农电工作部的领导、电力企业的专家、学者的高度重视和大力支持。王雨春专家对本书作了认真审稿。周敏跃、朱遵义、杨全凤、田穰、邹建忠、张政、窦建华、李箕胜、王洪焘、余文楷、徐增荣等众多专家和高级工程师为本书提供了不少资料和有益的建议，在此表示衷心感谢！

限于笔者的业务水平，书中定有不少错误和不妥之处，望读者批评指正。

编者

2002年2月

目 录

前言

第一章 电流对人体的影响及触电的种类	1
第一节 电流对人体的影响	1
一、感知电流	1
二、摆脱电流	1
三、致命电流	2
四、触电时间	2
五、人体电阻	4
第二节 农村电网触电事故的种类	5
一、触电的环境	5
二、触电者触摸导线的方式	6
三、触电时的接触方式	6
第三节 农村低压电网的保护措施	7
一、低压系统中字母的意义	8
二、几种接地	8
三、低压配电系统的接地方式	9
四、防止直接接触触电和间接接触触电的安全技术措施	12
思考题与习题	13
第二章 农村低压电网剩余电流保护系统	14
第一节 农村低压电网剩余电流保护系统的组成	14
一、剩余电流动作保护器	15
二、农村低压电网总开关	15
三、农村低压电网的用电设备	16
四、农村低压电网剩余电流保护系统的组成及要求	16
第二节 剩余电流保护系统的配置方式	17
一、国标对剩余电流动作保护器适用范围的规定	17
二、间接接触电击防护	17
三、采用二级保护时的两种形式	17
四、分级保护的具体实施	18
第三节 剩余电流保护系统各级保护的职责	20
一、历史的回顾	20
二、明确总保护、末级保护的具体职责	21
三、认真学习新规程	22
思考题与习题	22
第三章 剩余电流保护原理	23

第一节 农村低压电网的剩余电流及发生触电时的变化规律	23
一、单相电网的剩余电流	23
二、三相四线制电网的剩余电流	24
三、触电时电网剩余电流的变化规律	25
四、农网改造前后低压电网剩余电流比较	31
第二节 三相剩余电流动作保护器的动作原理	31
一、模值型剩余电流动作保护器的动作原理	31
二、模差型保护器的动作原理	34
三、鉴相鉴幅型保护器的动作原理	36
四、相量差型保护器的动作原理	37
第三节 家用剩余电流保护器原理	39
一、基本原理	39
二、零序电流互感器	40
三、不带过电流保护的家用剩余电流开关	40
四、带过电流保护的剩余电流断路器	41
思考题与习题	42
第四章 剩余电流继电器组成部分及工作原理	43
第一节 剩余电流继电器的组成部分	43
一、信号测量	43
二、信号放大	43
三、剩余电流鉴别	43
四、执行电路	43
五、直流电源	43
第二节 零序电流互感器	43
一、零序电流互感器的工作原理	44
二、对零序电流互感器技术性能的基本要求	45
三、互感器是引起保护器误动的重要自身原因	46
第三节 常用电路元器件	46
一、电阻器	46
二、电容器	50
三、二极管	52
四、三极管	54
第四节 半导体放大电路	56
一、放大器的工作原理	56
二、射极输出器	61
三、负反馈放大器	64
第五节 运算放大器	67
一、直流放大器	67
二、集成运算放大器	72
三、集成运算放大器的应用	73
第六节 直流电源的工作原理	75

一、变压器	76
二、整流和滤波	77
三、硅稳压管稳压电路	77
四、串联型晶体管稳压电路	78
五、集成稳压电源	80
第七节 其他常用电路	81
一、基本脉冲变换电路	82
二、二极管门电路	83
三、反相器	83
四、施密特触发器	84
第八节 剩余电流继电器的原理	85
一、模差型剩余电流继电器	85
二、模值延时型剩余电流继电器	90
思考题与习题	91
第五章 剩余电流保护装置的安装及投运试验	93
第一节 低压电网的整修	93
一、拆除被保护线路中性线的重复接地	93
二、拆除保护接零，增装保护接地	94
三、提高农户照明线路绝缘水平	95
四、将单相负载合理均匀地分布在三相上	95
第二节 剩余电流保护装置的安装及投运试验	95
一、剩余电流保护装置安装前的检查	95
二、零序电流互感器的安装	97
三、剩余电流保护装置的安装	99
四、保护装置安装后应进行投运试验	101
思考题与习题	102
第六章 剩余电流保护装置的管理和常见故障	103
第一节 剩余电流保护装置的质量管理	103
一、建议对安全认证的产品应实施质量的强制管理	103
二、建议开展对剩余电流保护装置的质量跟踪	103
第二节 剩余电流保护装置的运行管理	104
一、建议县供电企业应做的管理工作	104
二、建议县级供电企业对所辖乡供电所和用户有明确要求	104
三、乡供电所对剩余电流保护装置运行管理的要点	105
第三节 剩余电流保护装置运行中的常见故障	105
一、熔丝容量选择不当	105
二、被保护线路中个别三相电动机启动时保护装置误动	106
三、做接地试跳时剩余电流继电器动作接触器拒动或延时动作	106
四、剩余电流保护装置在运行中的常见故障	107
思考题与习题	108
第七章 剩余电流保护装置频繁动作原因的探索及消除方法	109

第一节 剩余电流动作保护器的使用现状	109
一、网改前剩余电流动作保护器的使用情况	109
二、网改后剩余电流动作保护器的使用情况	109
三、分级保护配合不当引起越级跳闸是总保护频繁动作的原因之一	110
第二节 剩余电流保护装置误动原因的探索	110
一、剩余电流保护装置的误动定义	110
二、保护器自身原因引起的误动	110
三、外部原因引起的保护器误动	112
第三节 消除和减少剩余电流动作保护器误动的方法	113
一、消除保护器自身原因引起误动的方法	113
二、消除或减少外部原因引起保护器误动的方法	113
三、对于家用剩余电流断路器越级跳闸的消除方法	115
思考题与习题	116
第八章 触电死亡事故与保护器投运管理	117
第一节 管理不善引起的触电伤亡事故	117
一、擅自将剩余电流保护装置退出运行	117
二、未定期对保护器做接地试跳	117
三、发现交流接触器有异常情况时未做及时处理	117
第二节 私拉乱接违章用电引起的触电伤亡事故	118
一、农村盖房私拉三相电源引起相与相的触电死亡事故	118
二、在家中电表上偷电引起相零触电死亡事故	119
三、特殊场合触电剩余电流保护装置无法动作引起的触电死亡事故	119
第三节 剩余电流动作保护器是假冒伪劣产品引起的 触电伤亡事故	119
一、假冒伪劣产品技术指标不合格产品不耐用	119
二、假冒伪劣产品工艺粗糙影响正常跳合闸	120
第四节 触电后抢救不当引起的死亡	120
一、不可让触电者强行站立或剧烈活动	120
二、不可用手扶拖拉机送卫生院抢救	120
三、不可乱做人工呼吸	120
第五节 从触电事故分析看保护器投运及管理的重要性	121
一、只有彻底根治误动才能确保总保护 100% 的投运率	121
二、剩余电流保护装置耐用是确保长期投运的关键	121
三、农电体制改革后必须大力普及安全用电知识	121
思考题与习题	122
第九章 剩余电流继电器的修理	123
第一节 LJ II 系列产品的特点	123
一、电源部分	123
二、零序电流互感器 TA	123
三、保护器的运行指示灯	124

四、试跳按钮.....	124
第二节 LJMⅡ—150/250A 漏电脉冲继电器的修理.....	124
一、对修理人员的基本要求.....	124
二、LJMⅡ—150/250A ($\pm 40\text{mA}$) 产品的修理.....	124
三、LJMⅡ—150/250A ($\pm 60\text{mA}$) 产品的修理.....	130
第三节 LJYⅡ—150/250A 延时型漏电继电器及 LJⅡ (J) 节电型产品的修理.....	133
一、LJYⅡ—150/250A 产品的相关图纸与图表.....	133
二、LJYⅡ—150/250A 产品的修理.....	133
三、LJⅡ (J) 系列产品的修理.....	135
第四节 LJⅡ 系列产品修理时的注意事项.....	137
思考题与习题.....	139
附录.....	140
参考文献.....	143

第一章 电流对人体的影响及触电的种类

本章主要介绍电流对人体的影响及触电的种类。经过农网改造后的我国低压电网，由于产权的变更，使得安全供电的法律责任更直接、更具体，因此在农村低压电网安装剩余电流动作保护器（原 GB6829—1986 国家标准中称之为漏电电流动作保护器，现为 GB6829—1995 国家标准中称之为剩余电流动作保护器）作为安全用电技术措施的重要后备保护就显得更加必要；同时也必须使广大用户知道：剩余电流动作保护器安装在农村低压电网中所组成的剩余电流保护系统，它不可能包罗万象，不是任何形式的触电均能保护的，用户在用电过程中应具有自我保护意识。

第一节 电流对人体的影响

实践证明，并不是所有的触电都会导致人的死亡，就大多数触电案例来看，触电后自己能主动摆脱电源者居多数。若触电后不能摆脱电源，就会造成死亡。触电后能否自己脱离电源，由触电时通过人体的电流大小决定。通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显，人的感觉就越强烈，破坏心脏正常工作所需的时间就越短，致命的危险也就越大。工频交流电通过人体时的电流大小不同，人体所呈现的状态也不同。

一、感知电流

感知电流是引起人的感觉的最小电流。实验资料表明，对于不同的人，感知电流也不相同。成年男性平均感知电流为 1.1mA，成年女性约为 0.7mA。

二、摆脱电流

摆脱电流是人触电后能自主摆脱电源的最大电流。对于不同的人，摆脱电流也不相同，成年男性平均摆脱电流 16mA，成年女性约为 10.5mA。成年男性最小摆脱电流 9mA，成年女性约为 6mA。最小摆脱电流是按 99.5% 的概念考虑的。

表 1-1 列出了摆脱电流范围内，触电后人的生理反映情况。

表 1-1 摆脱电流范围内，触电后人的生理反应情况

电流强度 (mA)	生 理 现 象
0~0.9	无感觉
0.9~3.5	感到麻木但非病态现象
3.5~4.5	有些不适的麻木痛楚，轻微痉挛，反射性的手指肌肉收缩
5.0~7.0	手感到有痛楚，且表面有痉挛
8.0~10.0	全手病态痉挛、收缩，且麻痹
11~12	肌肉收缩痉挛传至肩部，强烈疼痛（接触带电体时间不超过 30s）
13~14	手全部自己抓紧，须用力才能放开带电体（接触带电体时间不超过 30s）
15	手全部自己抓紧，不能放开带电体

此外，试验证明直流电流、高频电流、冲击电流对人体都有伤害作用，其伤害程度较工频电流要轻。直流最小感知电流男性为 5.2mA，女性约为 3.5mA；平均直流摆脱电流男性约为 76mA，女性约为 51mA。

三、致命电流

致命电流是指在较短时间内危及生命的最小电流。当有一较大的触电电流通过人体时，通过时间超过某一界限值，人的心脏正常活动将被破坏，心脏跳动节拍被打乱，不能进行强力收缩，从而失去循环供血的机能，这种现象就叫做心室颤动。

开始发生心室颤动的电流称为心室颤动电流，该电流也叫致命电流。有关它的大小，许多研究者得到的结论大体相似，通常认为：

(1) 人的体重越重，发生心室颤动的电流值就越大。

(2) 一般来说，电流作用于人体的时间越长，发生心室颤动的电流就越小。

(3) 当通电时间超过心脏搏动周期（人体的心脏搏动周期为 0.75s，是心脏完成收缩、舒张全过程一次所需要的时间）时，心室颤动的电流值急剧下降，也就是说，触电时间超过心脏搏动周期时，危险性急剧增加。

可能引起心室颤动的直流电流：通电时间为 0.03s 时约为 1300mA，3s 时为 500mA。当电流频率不同时，对人体的伤害程度也不同，频率是 25~300Hz 的交流电流对人体的伤害最严重，频率为 1000Hz 以上时对人体的伤害程度明显减轻，图 1-1 为人的模式心电图。

四、触电时间

表 1-2 是毕格麦亚根据心脏搏动周期所得实验结果，它证实了触电时间超过心脏搏动周期时危险性增加的结论。从该表中可以得出下述结论：

(1) 触电电流在 50mA 以内（表中 O、A₁、A₂、A₃ 区域），一般不致产生致命危险。

(2) 触电电流为数百毫安，若触电时间不超过 0.75s，也不致发生致命危险（B₁ 区域）。

(3) 超过数百毫安时将造成死亡（B₂ 区域）。

图 1-2 展示了人体发生心室颤动的界限。从图 1-2 中可以看出，当电流通过时间小于 1s 时，若要发生心室颤动，其电流需要值为 1000mA 左右。若通电时间超过 1s，发生心室颤动的电流只需 50mA，仅是前者的 1/20。这充分表明，通电时间比心脏搏动时间短时，电流虽高达数百毫安，触电者仍可得救。而当通电时间大于心脏搏动周期时，尽管电流只有 50mA，但触电者仍可丧命。由此可见，电流通过人体的作用时间，具有决定死亡与否的作用，为此目前国内已经投入使用的延时型剩余电流动作保护器其延时跳闸时间均小于心脏搏动周期 0.75s。

国际电工委员会（IEC）的 TC64 建筑电气设备专门委员会于 1974 年发表的 479 号《电流通过人体的影响》文件（简称 IEC—TC64）中提供的“触电电流和通电时间对人体影响曲线图”如图 1-3 所示。

国际电工委员会 1980 年根据科研新成果提供的电流通过人体影响曲线图如图 1-4 所示。

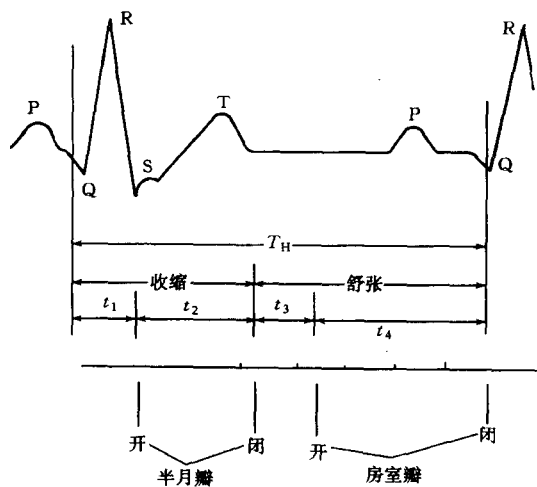


图 1-1 人的模式心电图
 T_H —心脏脉动周期； t_1 —收缩期； t_2 —挤出处；
 t_3 —舒张期； t_4 —充满期、休止、心房收缩

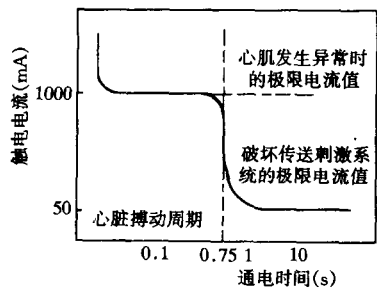


图 1-2 人体发生心室颤动的极限

表 1-2 毕格麦亚心脏搏动周期实验结果

电流范围	50~60Hz 电流 有效值 (mA)	通电时间	人 体 的 生 理 反 应
O	0~0.5	连续 (无危险)	未感到电流
A ₁	0.5~5.0 (摆脱极限)	连续 (也无危险)	开始感到有电流, 未引起痉挛的极限, 可以摆脱的电流范围 (触电后能自动摆脱, 但手指、手腕等处有痛感)
A ₂	5.0~30	以数分钟为极限	不能摆脱的电流范围 (由于痉挛, 已不能摆脱接触状态), 引起呼吸困难, 血压上升, 但仍属可忍耐的极限
A ₃	30~50	由数秒到数分钟	心律不齐, 引起昏迷, 血压升高, 强烈痉挛, 长时间将要引起心室颤动
B ₁	50~数百毫安	低于心脏脉动周期	虽受到强烈冲击, 但未发生心室颤动
		超过心脏脉动周期	发生心室颤动、昏迷, 接触部位留有通过电流的痕迹 (脉动周期相位与开始触电时间无特别关系)
B ₂	超过数百毫安	低于心脏脉动周期	即使通电时间低于脉动周期, 如在特定的脉动相位开始触电时, 要发生心室颤动、昏迷, 接触部位留有通过电流的痕迹
		超过心脏脉动周期	未引起心室颤动, 将引起恢复性心脏停跳、昏迷, 有烧伤致死的可能性

IEC—TC64 对 479 号文件修正的报告中提出了三区 (图 1-4 中 b、c 两曲线区域) 边界线的电流和时间的关系, 如表 1-3 所示。

表 1-3 电 流 与 时 间 的 关 系

人体电流 (mA)	29	45	56	72	102	160	204	256	368
允许时间 (s)	∞	1.2	0.83	0.63	0.48	0.4	0.35	0.3	0.17

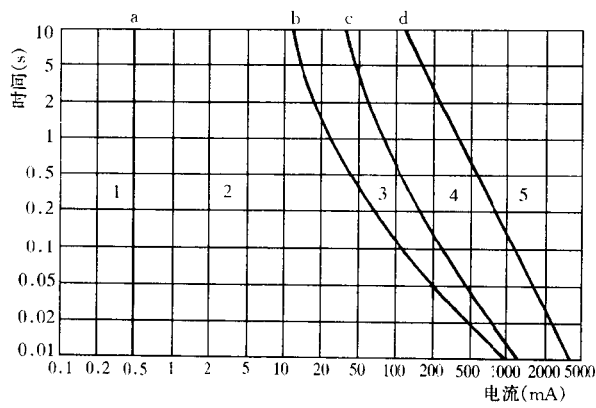


图 1-3 触电电流和通电时间对人体影响曲线图

线 a—为触电者有感觉与反应的起始线 (0.5mA)，在 a 线左方无感觉无反应，即“区域 1”为无反应区；从该线开始，往右方为有感觉有反应区；线 b—称安全曲线；曲线 a~b 之间为“区域 2”，为无病理、生理性危险；“区域 3”—曲线 b~c 之间，为无心室纤维颤动危险；“区域 4”—曲线 c~d 之间，为有可能发生心室纤维颤动，但概率小于 50%；“区域 5”—曲线 d 之右侧，发生心室纤维颤动，概率大于 50%

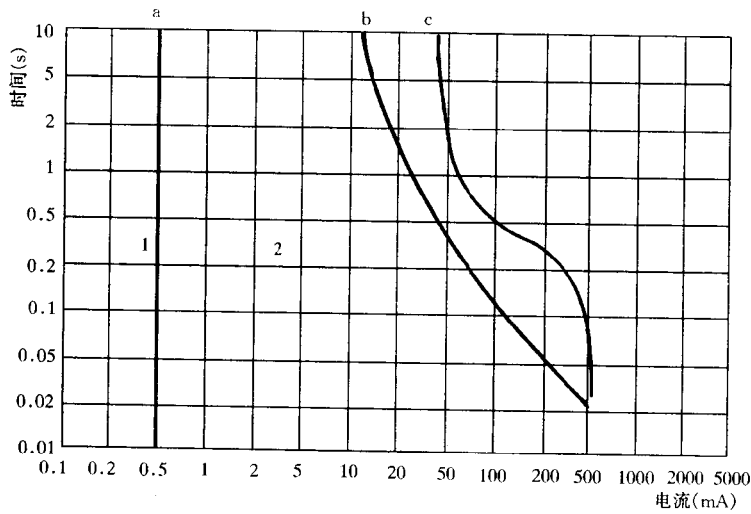


图 1-4 国际电工委员会 (IEC) 电流通过人体影响曲线

线 a 为触电者有感觉与反应的起始线，与图 1—3 线 a 的含义相同，线 b—称安全曲线，b~c 之间为非致命的病理生理效应区，可能发生痉挛、呼吸困难、心脏机能紊乱，线 c—在其右边，即“区域 4”为可能致命的心室颤动严重烧伤危险区

五、人体电阻

在表 1-3 中，由于直接用“电流—时间”的关系来考核设计比较困难，所以实际使用中“电流—时间”关系转换为“电压—时间”关系。为此，必须有一个人体电阻的假定值。

人体的电阻是指人体内部电阻和皮肤电阻之和。图 1-5 所示是佛莱贝尔加提出的人体

电阻等效回路。图 1-6 表示出了人体内部电阻的分布状态。人体内部电阻与人的高度成正比，与面积成反比。手和脚的电阻大，躯体部分电阻小。

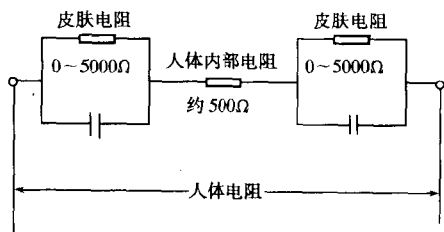


图 1-5 人体电阻的等效回路

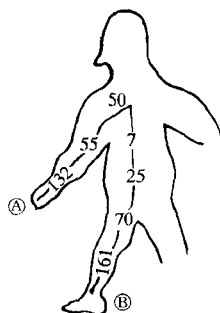


图 1-6 人体内部电阻的分布状态

注：A、B 间的总电阻为 500Ω

由图 1-5 可知，人体内部电阻恒定为 500Ω，且与接触电压无关。两侧为电流流入、流出点的皮肤电阻和皮肤电容。人体皮肤电容为 20nF/cm²，其值很小，一般可忽略不计。皮肤电阻因人而异，可能差距很大，而且还与接触电压及皮肤表面干湿程度有关。如果将干燥皮肤的电阻取为 1，那么有汗的皮肤电阻约为 1/10，而被水浸湿的皮肤，其电阻约为 1/25。

佛莱贝尔加还提出了接触电压与人体电阻的关系曲线，如图 1-7 所示。人体电阻随接触电压的升高而降低。

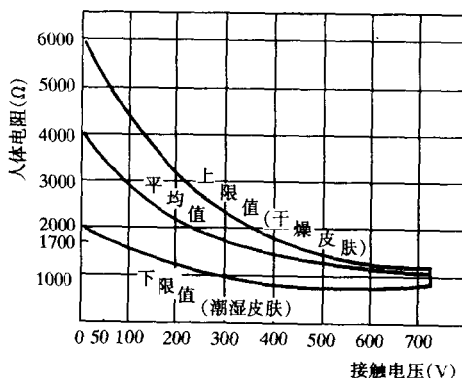


图 1-7 接触电压和人体电阻关系

在一般情况下触电时并不都造成生命死亡，其危险程度和触电者所处的地理环境，触电者的性别、体形、年龄、生理状态以及用电设备的电压及电流通过人体的途径有关。因此，安装在分支线路上作总保护的剩余电流动作保护器只作为间接接触电击保护。

第二节 农村电网触电事故的种类

据有关资料介绍，在我国农村触电死亡的人数中，发生在 6kV 以上高压系统（含雷击过电压触电）中的约占事故总数的 18%，而发生在 380/220V 低压电网的约为 82%。本书只对农村 380/220V 低压电网的种种触电进行讨论。分清了触电的种类就可以知道哪些触电是剩余电流动作保护器的职责范围，而哪些触电又不属于它的保护范围。

一、触电的环境

我国农村幅员辽阔，南北方地区气候差异大。南方雨水多、打雷多、台风多、气候潮湿，居民住宅地面绝缘程度低；北方地区气温低、干旱严重、风沙大。因此，广大农村中

发生在室内的触电事故约占总数的 20%，如电风扇、电熨斗等漏电引起的触电；而发生在室外的触电事故约占总数的 80%，如场头脱粒、小水泵电灌、盖房施工及抗洪排涝等临时性用电。

二、触电者触摸导线的方式

在农村低压电网中均采用 TT 系统供电，由于 380/220V 侧的中性点是直接接地的，因此发生触电有以下三种情况：

1. 单相触电

触电者站立在大地上，一只手触及其中一根相线，人体承受相电压，触电电流经过人体、大地和配电变压器的中性点接地装置形成闭合回路。这时触电电流数值决定于人体电阻，其计算公式为

$$I_{\text{ch}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ch}}}$$

式中 U_{ϕ} ——相电压；

R_{ch} ——人体触电时的电阻；

I_{ch} ——通过人体的触电电流。

此时的人体电阻决定于触电者所处的环境，是干地还是湿地或水中。

2. 两相触电

触电者的人体同时与两根相线接触，电流就由一根相线经过人体流至另一根相线。这种触电方式最危险，因为施加于人体的电压为线电压。这时触电电流的计算公式为

$$I_{\text{ch}} = \frac{U}{R_{\text{ch}}} = \frac{\sqrt{3} U_{\phi}}{R_{\text{ch}}}$$

若此时人体的电阻与单相触电时相等，那么两相触电时的触电电流是单相触电时触电电流的 $\sqrt{3}$ 倍。（指在相同人体电阻时比较）

3. 相零触电

触电者的人体同时与一根相线和一根零线接触，电流就由相线经过人体流至零线，施加于人体的电压为相电压，这种触电方式也是危险的。

三、触电时的接触方式

人们在日常生活的用电过程中，无论在室内还是室外，遭到电击的形式是多种多样的，但最终归纳为两种：直接接触触电和间接接触触电。

1. 直接接触触电

所谓直接接触触电，就是指因人体直接接触或过分靠近正常运行的带电体而受到电击。在我国农村低压电网采用中性点接地运行方式的 380/220V 系统中，可能发生直接接触触电的形式有：单相触电（相与大地）、相零触电和两相触电（也称相间触电）。

2. 间接接触触电

在农村低压电网中的各种受电器的非带电的金属部分，如电动机、洗衣机、电冰箱等电器的金属外壳，在正常运行情况下，由于绝缘物的隔绝，人碰触并不危险。但因种种原因，例如运行时间过久、绝缘老化、受潮、受损，绝缘物失去绝缘作用时，发生漏电时

该用电设备将会发生如图 1-8 所示的物理现象。图中 C 为故障电流入地点，此时将会以 C 为圆心，形成 20m 为半径的电场圆，它在大地表面的电位分布曲线如图中 A₁ 到 B₁ 的弧线。若此时有人在电场圆内行走，如图中的 A 和 B 两人，这时他们各人的两脚之间都产生电位差，这就是我们平时所说的跨步电压 U_1 和 U'_1 。这种由于跨步电压引起的触电就是间接接触触电的一种。据有关文献资料介绍：距农村低压电网 380/220V 故障电流入地点超过 5m 处、10kV 系统距故障电流入地点超过 8m 处，跨步电压则为零。

又如在图 1-8 中的 D 点，此处用电设备绝缘损坏，人若站在距设备水平距离为 0.8m 的地面、同时手碰触设备带电外壳（距离地面 1.8m），该人的手与足之间呈现的电位差称之为接触电压，用 U_2 表示。从图中可看出 D 人此时接触电压发生触电，这种触电就是间接接触触电的另一种形式。若距 C 处约 20m 的 B₁ 碰触用电设备时，接触电压为 U_3 ，从图中可知 $U_3 > U_2$ 。由此可知，接触电压和跨步电压相反，距故障电流入地处 C 越近，接触电压越小。若距 C 点 20m 以外，接触电压将是用电设备带电体的对地电压 U_3 。例如，在低压 380/220V 系统中，若在 C 处碰触电气设备带电外壳，人体承受的接触电压为 $220 - 220 = 0V$ 。若在距 C 点 20m 处碰触用电设备带电体外壳，所承受的接触电压为 $220 - 0 = 220V$ ，即等于带电设备的对地电压。

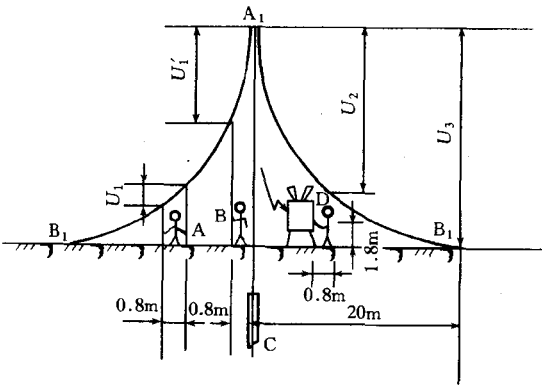


图 1-8 跨步电压与接触电压

根据国际电工委员会 IEC—TC64 文献介绍，保护装置保护的电气设备发生故障后，保护装置必须在表 1-4 中规定的最大接触电压持续时间内自动切断电源。

表 1-4 IEC—TC64 最大接触电压持续时间

最大切断时间 (s)	预期接触电压 (V)		最大切断时间 (s)	预期接触电压 (V)	
	交流电压 (有效值)	直流电压		交流电压 (有效值)	直流电压
∞	< 50	< 120	0.2	110	175
5	50	120	0.1	150	200
1	75	140	0.05	220	250
0.5	90	160	0.03	280	310

第三节 农村低压电网的保护措施

低压电网与电气设备的接地运行方式一般分为两种：一种是配电变压器中性点直接接地运行方式，另一种是配电变压器中性点非直接接地方式。据我国有关文献资料介绍，低压系统的运行方式可分为三类五种，这些均是农村低压电网保护措施的内容。