

[开关设备]

低压配电系统中剩余电流保护装置选型与使用

文/北京华电瑞通电力工程技术有限公司 焦 杨 李远真 曹云峰 杜 夏

剩余电流保护装置（俗称“漏电开关”）是配电行业中安全用电必不可少的开关电器。当系统中发生有设备外壳带电或人身触电时，能自动切断电源，有效防止触电事故。介绍了几种民用建筑低压配电系统中剩余电流保护装置的选择与使用。

目前，配电系统中常用的剩余电流保护装置主要作用原理是判断相线与N线通过剩余电流互感器时电流流进流出的矢量和是否为零。当发生外壳带电或人身触电时，一部分电流会随保护地线回到变压器中性点，导致通过剩余电流互感器的相线与N线的矢量和不为零，当达到剩余电流保护装置设置的漏电电流值时，可驱动开关的执行机构跳闸，切断电源。《民用建筑电气设计规范》JGJ/T16—2008将低压配电系统分围TT、TN和IT系统，这3种系统各有优缺点，但在现场用电过程中还存在低压配电系统接地形式混用的做法，导致许多事故的发生，为避免此类事故，剩余电流保护装置在低压配电系统的正确应用便尤为重要。

剩余电流保护装置在各接地系统中选用原则

1. TT系统

TT供电系统是一种将系统中性点直接接地的三相四线系统，其所有设备的外露可导电部分经各自的保护线PE分别直接接地。

如图1所示，TT系统又称为保护接地系统，TT系统中的负载的所有接地均称为保护接地。

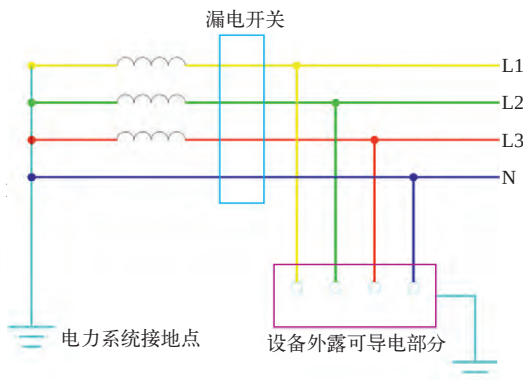


图1 TT系统示意图

如图2所示，TT系统中当某一负载发生单相碰壳，此时设备外壳带电，忽略变压器阻抗和线路阻抗，则故障电流是经过设备外壳的接地电阻 R_e 和人体电阻 R_p 的并联再与工作接地电阻 R_n 构成的回路。

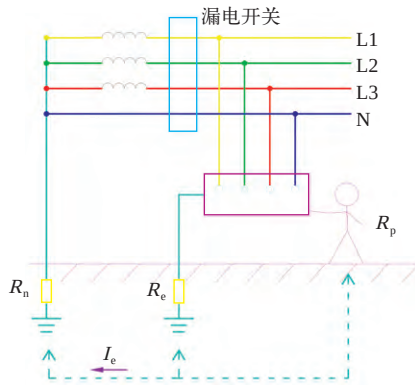


图2 TT系统漏电示意图

其等效电路图如图3所示。

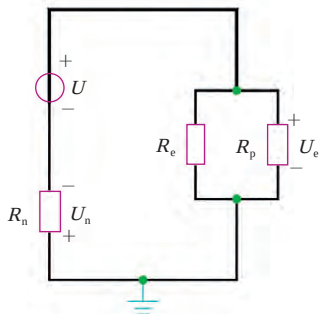


图3 TT系统漏电等效电路图

$$U_e = \frac{U}{\frac{R_e R_p}{R_e + R_p} + R_n} \times \frac{R_e R_p}{R_e + R_p} \quad (1)$$

$$U_n = \frac{U}{\frac{R_e R_p}{R_e + R_p} + R_n} \times R_n \quad (2)$$

由于 $R_e \leq R_p$, $R_n \leq R_p$, 故可近似简化为

$$U_e = \frac{R_e}{R_e + R_n} \times U \quad (3)$$

$$U_n = \frac{R_n}{R_e + R_n} \times U \quad (4)$$

根据民用建筑电气设计规范JGJ/T 16—2008中第12.5条, 低压电力网中, 电源中性点的接地电阻不宜超过 4Ω , 保护接地电阻不宜超过 10Ω 。

人体在正常环境下的安全接触电压为 36 V 。因为 R_e 和 R_n 的接地电阻值比较接近, 在同一个数量级, 在设备相线碰壳时漏电设备故障电压明显降低, U_e 和 U_n 都可能超出安全电压, 这时当人触及漏电的设备外壳或零线时都可能受到致命电击。

$$\text{故障电流 } I_e = \frac{U}{R_e + R_n}$$

假设 $R_e = 4 \Omega$, $R_n = 4 \Omega$, 忽略线路阻抗, 那么

$$I_e = \frac{220 \text{ V}}{4 \Omega + 4 \Omega} = 27.5 \text{ A}$$

这个故障电流不是短路电流, 即使是一般的过电流保护, 低压断路器也不一定跳闸, 熔断器也不一定熔断, 故障电流将长期存在。

要降低设备外壳对地电压, 一种方式是降低 R_e 的接地电阻值, 但这样一来, 势必会使敷设PE线成本会大大增加, 在有些情况下很难做到。另一种方式是采用剩余电流保护装置作为保护电器, 这个剩余电流保护装置对接地故障有着较高的灵敏度, 当发生外壳带电或人身触电时, 剩余电流保护装置可迅速切断电源, 防止电击事故。在选择剩余电流保护装置的动作电流时, 不能选择太小, 还应考虑电缆线路的泄露电流。

在TT系统中采用剩余电流保护装置, 应注意以下几点。

1) 在供电线路干线上使用剩余电流保护装置, 其后端所有工作零线的重复接地应全部解除。

2) TT供电系统不允许断零, 若是断零, 三相不平衡, 会使中性点电位产生漂移, 使个别相线电压升高, 可能会烧毁设备, 严重时可能会烧毁整个单元或整栋楼家电, 甚至可能会导致火灾事故。

3) TT系统的电气线路或电气设备必须装设剩余电流保护装置作为防电击事故的保护措施, 宜选择四极四线剩余电流保护装置, 切断相线的同时切断零线, 因为系统中性点与保护接地未作等电位联接, 它与地间存在故障电压引起的电位差, 会对电气检修人员构成电击危险。但基于上面第2条所述, 四极四线剩余电流保护装置也需谨慎, 存在断零风险。

2. TN系统

TN系统是一种将系统中性点直接接地, 且所有设备的外露可导电部分直接与系统接地点相连, TN系统又称为接零保护系统。

TN供电系统中, 根据其保护零线是否与工作零线分开而划分为TN-C、TN-S和TN-C-S。

(1) TN-C系统

TN-C系统是工作零线与保护零线合一的系统, 俗称三相四线制。如图4所示。

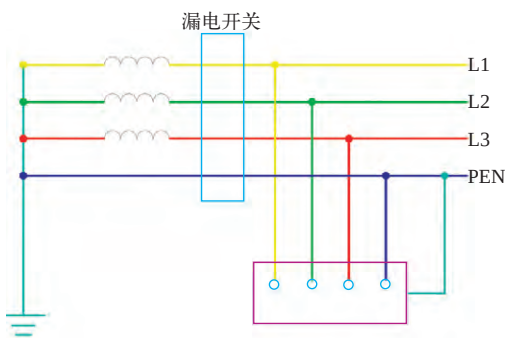


图4 TN-C系统示意图

工作零线与保护零线合一后, 称为保护中性点, 又称PEN线。

TN-C系统中, 所有设备外壳的保护接地直接接PEN线上, 而且PEN线应重复接地, 其作用是当设备发生相线碰壳时, 可以有效降低零线对地电压。

TN-C供电系统适用于三相负荷基本平衡的系统,如果三相不平衡,那么PEN线中有不平衡电流,从而中性线带电,而且有可能高于安全电压,对人身造成触电危险。

一般情况下,当发生单相碰壳的情况下,PEN作为故障电流的回流导线,故障电流经PEN线回到中性点,由于短路电流大,可采用过流保护开关直接切断电源。

如果PEN线在开关后没有重复接地,或者外壳没有接地,如果设备发生漏电,但未达到短路电流和过载电流,开关的短路保护和过载保护不会动作,开关不会跳闸,由于漏电电流又流回了PEN线,那么剩余电流保护装置检测不到漏电存在,那么漏电保护也不会动作,此时,漏电设备外壳是带电的,很有可能设备外壳对地电压高于安全电压,人身有触电危险。只有人去碰了设备外壳,被电击了,剩余电流保护装置才有可能跳闸。

如果要在TN-C供电系统干线上使用剩余电流保护装置,那么工作零线所有的重复接地必须拆除,否则剩余电流保护装置合不上。而且PEN线在任何情况下不能断线,否则会造成PEN线电位漂移,使所有的设备外壳带电。

即便是解除重复接地,设备外壳若依然接的是PEN线,剩余电流保护装置依然起不到保护作用。设备外壳需单独接从上一级开关分出来的PE线,或接就近接地极。这样一来,这个TN-C系统相当于被改成了TN-C-S系统或者局部TT系统。

所以,TN-C系统不宜使用剩余电流保护装置,需被改造为TN-C-S、TN-S或局部TT系统,才能装剩余电流保护装置。

(2) TN-S系统

TN-S系统是工作零线N和保护线PE严格分开的系统,俗称三相五线制。如图5所示。

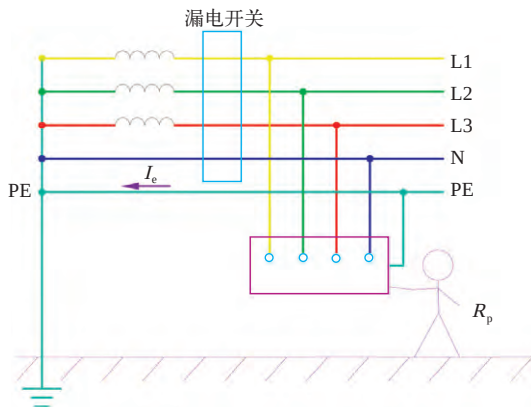


图5 TN-S系统示意图

1) 当设备发生相线碰壳,直接短路,开关的短路保护或过流保护可动作。

2) 由于设备外壳直接接PE线,当设备发生漏电时,漏电电流会从PE线回流,当漏电电流达到动作整定值,剩余电流保护装置会动作。

3) TN-S系统,N线不能做重复接地,PE不能断线但需要做重复接地。

所以,TN-S系统供电干线上可以安装剩余电流保护装置,建议安装三级四线开关,N线不随剩余电流保护装置分断。

(3) TN-C-S系统

TN-C-S供电系统,前半部分采用TN-C方式供电,通过系统总配电箱分出PE线,后半部分为TN-S方式供电。如图6所示。

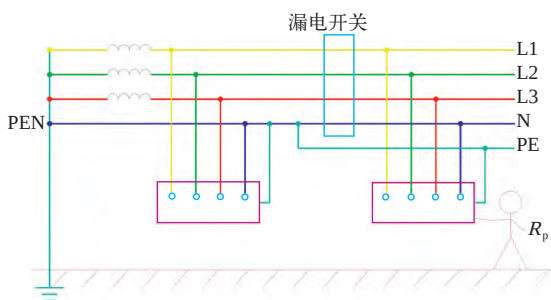


图6 TN-C-S系统示意图

系统的前半部分的PEN线可重复接地,PE和N分开后,PE可重复接地,N不得再重复接地。

某公司生产的采用TN-C-S系统的低压电缆分支箱,进线电缆为四芯电缆,直接进入带漏电保护功能的塑壳断路器,在进线开关的出线侧,将PEN线分开为PE线和N线,导致低压电缆分支箱应用到常规住宅配电系统中,进线塑壳断路器合不上闸。

其原因是,在住宅配电系统中,有很大一部分单相用电设备,系统的三相是不平衡的,那么在系统中性线N中必然有不平衡电流,当N和PE线分开后,如果PE线有重复接地,或者有设备外壳接地,那么中性线中一部分不平衡电流会从PE线经接地极回流到系统接地点,这样经过剩余电流互感器的电流的矢量和必然不为零,所以进线塑壳断路器会合不上闸。另一方面,即使将进线开关后所有的N和PE的重复接地全部解除,设备外壳没有接地,那么即便发生相线碰壳漏电,但是漏电电流不够使进线塑壳的短路保护和过电流保护跳闸,那么漏电电流也会随PEN线流入到进线塑壳断路器的剩余电流互感器中,忽略线路的泄漏电流,这时经过互感器的电流的矢量和为零,剩余电流保护不动作,但这时,线路上所有接PE线保护接地的负载外壳上都带

有不安全电压，这是不安全的，容易引起触电。

所以在TN-C-S这种系统下，安装剩余电流保护装置需在总箱处由三相四线TN-C变为三相五线TN-S后再安装剩余电流动作保护装置，不能装在TN-C部分。

3. IT系统

IT供电系统，电源侧没有工作接地，或者经过高阻抗接地。设备的外露可到店部分经过各自的保护线PE分别直接接地，俗称三相三线制。

中性点不接地IT系统，如图7所示。

中性点经高阻抗接地IT系统，如图8所示。

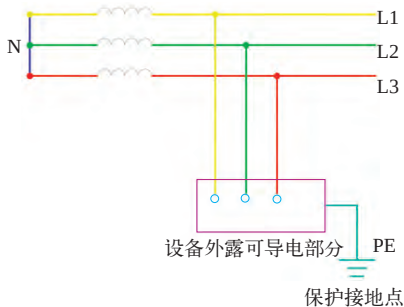


图7 中性点不接地IT系统示意图

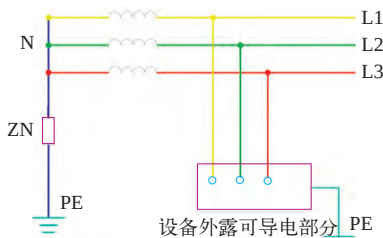


图8 中性点经高阻抗接地IT系统示意图

IT供电系统一般用于不允许停电场所，或者是要求严格连续供电的地方，或者是供电条件较差电缆易受潮的环境中。

如图9所示，如果IT系统为中性点不接地系统，在供电距离不是很长时，那么系统中当某一负载发生单相碰壳，此时设备外壳带电，忽略变压器阻抗和线路阻抗，则故障电流是经过设备外壳的接地电阻 R_e 和人体电阻 R_p 的并联再与线路与大地间的电容阻抗 R_c 构成的回路。

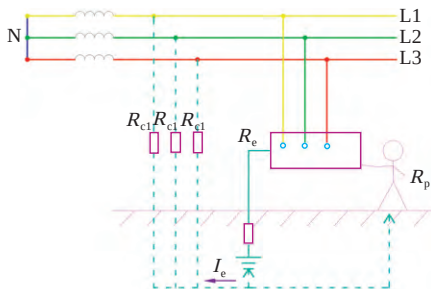


图9 中性点不接地IT系统发生漏电示意图

其等效电路图如图10所示。

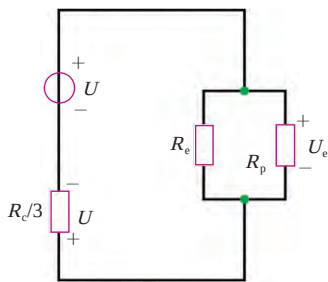


图10 中性点不接地IT系统发生漏电等效电路图

$$U_e = \frac{U}{\frac{R_e R_p}{R_e + R_p} + \frac{R_c}{3}} \times \frac{R_e R_p}{R_e + R_p} \quad (5)$$

$$U_c = \frac{U}{\frac{R_e R_p}{R_e + R_p} + \frac{R_c}{3}} \times \frac{R_c}{3} \quad (6)$$

由于 $R_e \leq R_p$, $R_p \leq R_c$, 故上次可近似简化为

$$U_e \approx 0$$

$$U_c \approx U$$

由于单相接地与本身该相不存在电压差，所以这里的 $\frac{R_c}{3}$ 也属于一个近似值，这里的 U 可近似看做系统线电压。

运用IT供电系统，在供电距离不是很长时，供电的可靠性高，安全性好。即使电源中性点不接地，一旦设备漏电，接地故障电流仅为非故障相对地的电容电流，其电流值很小，不会破坏电源电压的平衡。但是如果用在供电距离很长时，供电线路对大地的分布电容就不容忽视了，在负载发生短路或者相线碰壳时，漏电电流经大地形成架路，保护设备不一定动作，这是危险的。

如果IT系统是中性点经过高阻抗接地系统，系统中当某一负载发生单相碰壳，其系统漏电示意图如图11所示。

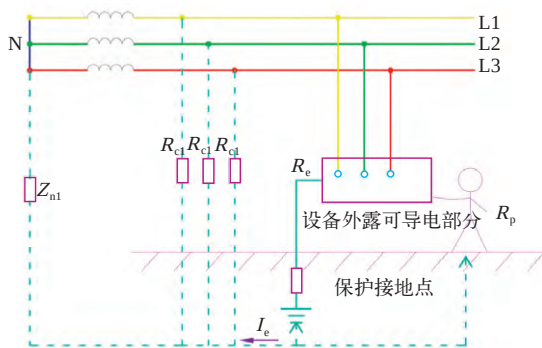


图11 中性点经高阻抗接地IT系统发生漏电示意图

其等效电路相当于图12所示,由于单相接地与本身该相不存在电压差,所以这里的 $\frac{R_c}{3}$ 也属于一个近似值,这里的 U_L 可近似看作系统线电压,这里的 U_N 为系统相电压。

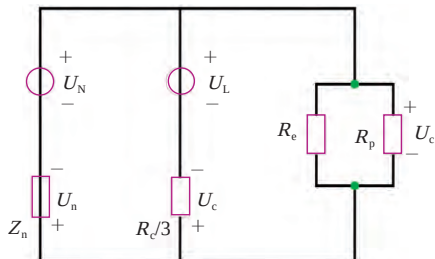


图12 中性点经高阻抗接地IT系统发生漏电示意图

其和中性点不接地的IT系统一样,在供电距离不是很长时,供电的可靠性高,安全性好。但在供电距离很长时,就需要考虑线路对大地的分布电容,这是危险的。

所以针对IT系统,一般不适合使用常规的剩余电流保护的剩余电流保护装置,需使用特殊的带绝缘电阻检测或其他特殊功能的保护装置。

剩余电流保护装置动作电流值和动作时间的选取

1. 额定动作电流值

参照《民用建筑电气设计规范》JGJ/T 16—2008中第12.3.7条,可按下列数据选定。

- 1) 手握式用电设备为15 mA。
- 2) 环境恶劣或潮湿场所的用电设备为6~10 mA。
- 3) 医疗电气设备为6~10 mA。
- 4) 建筑施工工地的用电设备为15~30 mA。
- 5) 家用电器回路为30 mA。
- 6) 成套开关柜、分配电盘等为100 mA以上。
- 7) 防止电气火灾为300~500 mA。

2. 额定动作时间

当确定选择两级分级保护时,设在低压配电室引出的配电干线回路首端的第一级保护,动作时间为0.5~1 s;设在各防火分区、功能分区和楼层的总(分)配电箱电源进线处,或末端配电箱的进线处的第二级保护,动作时间为0.3~0.5 s;设在末端配电箱分支线回路上的第二级保护,主要作为间接接触防护,动作时间小于或等于0.1 s。

当确定选择三级分级保护时,设在低压配电室引出的配电干线回路首端的第一级保护,动作时间为0.7~1 s;设在各防火分区、功能分区和楼层的总(分)配电箱电源进线处的第二级保护,动作时间为0.5~0.7 s;设在末端配电箱的电源进线处的第三级保护,动作时间为0.3~0.5 s;设在末端配电箱分支线回路上的第三级保护,主要作为间接接触防护,动作时间小于或等于0.1 s。

如果一个供电系统存在两级或者以上的剩余电流保护装置,那么为了避免下级顶上级跳闸的发生,这两级剩余电流保护装置选择上就要不同了,一般要满足两点:额定动作电流值上级是下级的3倍;上下级剩余电流保护装置的动作时间差不得小于0.2 s。

结束语

根据常规配网系统各种接地方式,从系统安全的角度说明了剩余电流保护装置的选用规则及安装方式是,TT系统宜采用四级四线式剩余电流保护装置,N级与相线共同分断,但需慎用。TN-C系统和IT系统不宜使用剩余电流保护装置。TN-S系统和TN-C-S系统宜使用三相四线式剩余电流保护装置,N极不分断。EA

(收稿日期:2015.07.31)

(编辑:白文亭)

大全武汉研究院战略规划及风险风险评估委员会主任马伟明院士荣获何梁何利基金最高奖

2015年11月4日,何梁何利基金2015年度颁奖大会在北京钓鱼台国宾馆举行。大全集团武汉新能源接入装备与技术研究院战略规划及风险风险评估委员会主任、中国工程院院士马伟明荣获年度最高奖项“科学与技术成就奖”。

马伟明院士是前任大全武汉研究院院长,长期致力于舰船电气工程领域研究,在舰船综合电力技术、电磁发射和新能源接入技术等领域开展了一系列应用基础理论研究、关键技术攻关和重大装备研发,取得一批具有完全自主知识产权的原创性成果。

