剩余电流动作保护器（RCD）综述

对剩余电流动作保护器的由来，不同场合不同选择的规律进行综述，以期能在实际应用中正确选择适合的产品与参数。

贺　杨／宁夏建筑设计研究院有限公司

贺　杨／工程师

关键词/Keywords
剩余电流动作保护器；RCD；

0　引言

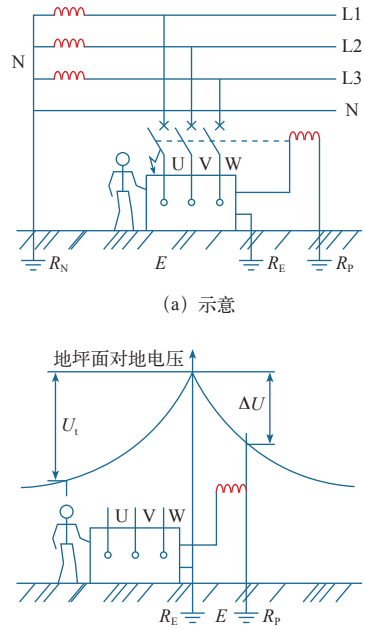
剩余电流动作保护器（Residual Current Operated Protective Devices，RCD）是IEC对电流型漏电保护电器的规定名称，指在同一时间内一回路给定点处所有带电导体电流的相量和超过整定值时，能自动切断电源的防护电器。

这是一项源自1928年德国人申请的专利。该专利提出：“人体触及带电导体时所通过的电流，以零序电流互感器检测，并在人受伤害之前，快速切断电流，从而达到保护目的。”尽管在当时，对于“伤害人体的电流”是多大；“受伤害之前”的时间是多少等均还没有科学清楚的概念，但这一设想无疑具有十分重要的工程意义。在电流通过人体时效应的研究基本完成以后，将这一设想应用于工程实践，就取得了良好的效果。

1　漏电保护电器的发展

漏电保护的概念最早可追溯到19世纪初。19世纪20年代，人们首先开发出了一种故障电压动作型防护电器，它的原理简单而直接：既然电击伤害是由于设备外壳带有对地电压产生的，那么就利用这个电压来驱动脱扣器断开电源。

然而，实践的结果却证明，这种方式并不可靠。首先，脱扣器上电压ΔU与人体接触电压U_t并不对应，电压型漏电保护如图1所示。



（a）示意

（b）电压差异

图1　电压型漏电保护

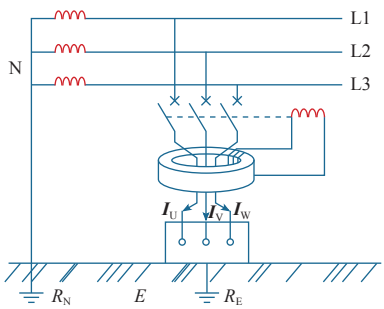
脱扣器所承受的电压跟脱扣器接地极与设备主接地极间的距离有关。通常情况下，人体触及设备外壳时所处等位面不一定与脱扣器接地极所处等位面相同，这就造成了两者所承受电压的不一致，这种不对应就使得脱扣器动作电压的整定变得十分困难。

其次，这种漏电保护不能作为直接电击防护。因为在工程中还存在其他一些实施上的困难，现在各国规范（包括IEC标准）均不推荐使用电压型漏电保护，而电流型漏电保护因其原理上的合理性和工程实施上的方便性，得到了广泛的应用。

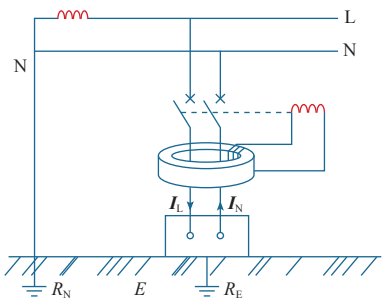
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　剩余电流动作保护器的工作原理

剩余电流动作保护器（RCD）的核心部件是剩余电流检测器件。现以电磁型RCD中使用的零序电流互感器为例，剩余电流检测如图2所示。



（a）三相



（b）单相

图2　剩余电流检测

正常工作时有电流通过的所有线路（指相线和中性线，不包含PE线）均穿过零序电流互感器的铁心环。根据基尔霍夫电流定律，正常工作时这些电流相量和为零，不会在铁心环中产生磁通并感应出二次侧电流。以图2a为例，当设备发生碰壳故障时，有电流从接地电阻R_E上流回电流，此时$\boldsymbol{I}_U+\boldsymbol{I}_V+\boldsymbol{I}_W=\boldsymbol{I}_{R_E}\neq 0$，（$\boldsymbol{I}_U+\boldsymbol{I}_V+\boldsymbol{I}_W$）产生的磁场会在互感器二次侧绕组上产生感应电动势，从而在闭合的二次侧线圈内产生电流。这个电流就是漏电故障发出的信号，其强度与一次侧$|\boldsymbol{I}_{R_E}|$呈正相关，一次侧$|\boldsymbol{I}_U+\boldsymbol{I}_V+\boldsymbol{I}_W|\neq 0$的部分即为剩余电流。根据检测到的剩余电流大小，保护电器通过预设的程序发出各种指令：或切断电源；或发出信号等。

需要说明的是，漏电保护中的剩余电流与零序电流是不同的概念，尽管有时它们会是同一个电流，文献[2]中对此有详细的讲解，在此不赘述。这里所说的“剩余电流”，是指从设备工作端子以外的地方流出去的电流，也即通常所说的漏电电流。一般情况下，这个电流是从I类设备的PE端子流走的，但当人体发生直接电击时，从人体上流过的电流便成了剩余电流，因此剩余电流保护可以用于直接电击防护的补充保护。

3　剩余电流动作保护器的功能

电击危险防护有两种基本情况：故障保护（间接接触）和基本保护（直接接触）。根据文献[4]中的描述：“RCD的主要功能或基本功能是提供故障防护，但作为具有足够灵敏度的电器（指额定剩余动作电流不大于30 mA的RCD）还有一个附加的好处：即使其他防护措施失效或者电气装置或设备使用者疏忽，该电器对与带电的导体部件直接接触的使用者能提供保护，即作为直接电击防护的附加措施。”需要注意的是，这种补充是不能替代绝缘、屏护与间距等基础防护措施的。

此外，规范里还提到：“RCD能对过电流保护电器不动作而长期持续的接地故障电流产生的火灾危险提供保护。”

4　剩余电流动作保护器的应用场合

在文献[5]第4.5条中明确规定了必须安装RCD的设备和场所包括：①属于I类的移动式电气设备及手持式电动工具；②生产用的电气设备；③施工工地的电气机械设备；④安装在户外的电气装置；⑤临时用电的电气装置；⑥机关、学校、宾馆、饭店、企事业单位和住宅等除壁挂式空调器电源插座外的其他电源插座或插座回路；⑦游泳池、喷水池和浴池的电气设备；⑧安装在水中的供电线路和设备；⑨医院中可能直接接触人体的电气医用设备（指GB 9706.1医用电气设备第一部分通用安全要求中H类医用设备）；⑩其他需要安装RCD的场所；⑪低压配电线路根据具体情况采用二级或三级保护时，在总电源端、分支线首端或线路末端（农村集中安装电能表箱、农业生产设备的电源配电箱）安装RCD。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在文献[5]第4.6条中规定了为避免因停电造成重大经济损失及不良社会影响，应装设报警式RCD的情况（为防人身电击事故，下列场所的负荷末端保护不得采用报警式RCD）：①公共场所的应急电源、通道照明；②确保公共场所安全的设备；③消防设备的电源；④防盗报警的电源；⑤其他不允许停电的特殊设备和场所。

在文献[5]第4.7条中规定了可不装设RCD的情况：①使用安全电压供电的电气设备；②一般环境条件下使用的具有加强绝缘（双重绝缘）的电气设备（II类电气设备）；③使用隔离变压器且二次侧为不接地系统供电的电气设备；④具有非导电条件场所的电气设备；⑤在没有间接接触电击危险场所的电气设备。

5 剩余电流动作保护器的局限性

RCD在上述诸多场合中的应用，并不意味着RCD是全能与普遍适用的。相反的，在某些方面，RCD的作用也是有一定的局限性：

1）不能防止从别处沿PE线或装置外可导电部分传导来的故障电压引起的电击事故。

2）有些重要负荷，例如医院内胸腔手术器件，其正常泄漏电流仅允许0.01 mA，发生接地故障时的故障电流仅允许0.05 mA，RCD的动作灵敏度远远达不到这一要求。

3）电子式RCD在诸多条件与环境中，均存在拒动作等局限性，详见文献[9]中分析。

4）电子信息设备的回路若装有大容量滤波电容器，可能由于电容器泄漏电流太大而无法装用RCD。

5）在爆炸等危险场所，产生电火花的瞬间即能引爆，使用RCD切断电路对防爆没有直接作用，只能选用适合的接地型式和采取等电位联结等措施减少电位差，避免电火花的产生。

下面，结合RCD的特性参数和分类，对RCD的选用作以介绍。

6 剩余电流动作保护器的特性参数与选择

这里重点介绍RCD的两项主要参数，这是选取RCD的核心内容。

（1）额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$

额定剩余动作电流指在规定条件下，RCD必须动作的剩余电流值。国家标准规定的额定剩余动作电流值，优先推荐采用的有：6 mA、10 mA、30 mA、100 mA、200 mA、300 mA、500 mA、1 A、2 A、3 A、5 A、10 A、20 A和30 A，共14个等级。其中，30 mA及以下属于高灵敏度，主要用于电击防护；100 mA～1 A属于中等灵敏度，用于电击防护和漏电火灾防护；1 A以上属于低灵敏度，用于漏电火灾防护和接地故障监视。

（2）额定剩余不动作电流$I_{\Delta no}$

额定剩余不动作电流指在规定条件下，RCD必须不动作的剩余电流值。额定剩余不动作电流$I_{\Delta no}$总是与额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$成对出现，优选值为$I_{\Delta no}=0.5I_{\Delta n}$（$0.5I_{\Delta n}$值仅指工频交流剩余电流）。如果$I_{\Delta n}$是保证RCD不拒动作的下限电流值，$I_{\Delta no}$则是保证RCD不误动作的上限电流值。

当判断一只RCD是否合格时，若RCD的动作剩余电流值为I_{Δ}，则一定要$I_{\Delta}\leqslant I_{\Delta n}$和$I_{\Delta}\geqslant I_{\Delta no}$同时满足才是合格的。这即是说，在制造产品时，RCD的实际剩余动作电流I_{Δ}在[$I_{\Delta no}$，$I_{\Delta n}$]之间是正确的；而在设计时，应使设计要求的剩余动作电流值I_1和剩余不动作电流值I_2在[$I_{\Delta no}$，$I_{\Delta n}$]之外才是正确的。

所以，选用的RCD的$I_{\Delta no}$要求大于正常剩余电流值。在实际应用中，一般用额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$来计算。考虑到留有裕量，以适应回路绝缘电阻降低、用电设备增加、过大电压正偏差以及气候变化等因素引起的剩余电流增大，有如下计算要求（I_{lk}为正常剩余电流）：

1）用于单台用电设备时，$I_{\Delta n}\geqslant 4I_{lk}$。

2）用于线路时，$I_{\Delta n}\geqslant 2.5I_{lk}$，且同时$I_{\Delta n}$还应满足不小于其中最大一台用电设备正常运行时剩余电流值的4倍。

3）用于全网保护时，$I_{\Delta n}\geqslant 2I_{lk}$。

关于配电线路和用电设备正常剩余电流值的数据，详见文献[3]中表11－43～表11－45中数值。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

7 剩余电流动作保护器的常见分类与选择

从不同的角度出发，可将RCD作不同的分类。

（1）按漏电保护装置中间环节的形式分

1）电磁式RCD。依靠接地故障电流的能量动作，因其全部采用电磁元件，使得其耐过电流和过电压冲击能力以及抗干扰能力都比较强，且无须辅助电源。但其灵敏度不易提高，工艺复杂，早些年造价较高，目前随着技术进步发展，售价已与电子式相近或相同。

2）电子式RCD，又可分为集成电路式和分立元件式。这是借助于所在回路处的故障残压提供的能量动作。因为是通过电子线路对互感器检测到的电流信号进行比较放大，所以灵敏度高，动作电流和时间的调整都很方便，但需要辅助电源才能工作，且抗干扰和抗过电压能力较差。

电子式RCD动作可靠性不及电磁式RCD，电子式RCD在诸多条件与环境中存在拒动作也是RCD的使用局限性之一。根据文献[6]第531.2.2.2条规定，只有满足下列两个条件之一时，才允许采用在辅助电源失效的情况下不自动动作的带辅助电源的RCD（即电子式RCD）。

1）即使在辅助电源失效的情况下，仍能满足GB 14821.1－93，idt IEC 364－4－41：1992《建筑物电气装置电击防护》中7.1条规定的防间接接触保护的要求。

2）安装在电气装置中的保护电器由专职人员或熟练的人员进行操作、试验和检查。

第一条强调除使用电子式RCD外，其余间接接触防护措施（例如等电位联结）的完整和可靠，这就保证了在电子式RCD出现拒动作时，仍可不发生间接接触电击事故；第二条是专业人员能了解电子式RCD的特性和使用要求，在使用中加以注意，可避免间接接触电击事故的发生。

由此可知：电子式RCD的选用是有条件的，在设计选用时需要辅以其他一些防电击措施并切实执行。文献[7]第7.7.10条第9款据此也对两种RCD的选用作以规定：

1）用于电子信息设备、医疗电气设备的RCD应采用电磁式。

2）用于一般电气设备或家用电器回路的RCD宜采用电磁式或电子式。

（2）根据剩余电流大于$I_{\Delta n}$时的延时分

1）无延时，用于一般用途。

2）有延时，用于选择性保护或存在谐波的影响时：延时不可调节；延时可以调节。

有延时RCD除了分断时间外，还有一个极限不驱动时间，也即是给定剩余电流值的延时设定时间，具体数据详见文献[4]中表1～表7中数值。

同短路保护或过载保护类似，多个RCD串联使用时，也存在上下级选择性动作的问题。相似地，这种选择性也是通过动作电流或动作时间的配合来实现，一般有以下原则：

1）电流选择性。电源侧（上级）RCD的额定动作电流应为负荷侧（下级）RCD的3倍及以上。

2）时间选择性。电源侧（上级）RCD的极限不驱动时间应大于负荷侧（下级）RCD的动作时间。

相比而言时间选择性更为重要，通常上下级RCD时间差要求不小于0.2 s。

此外，谐波可能通过较低的对地容抗造成泄漏电流较大，而致RCD误动作，如感应雷电过电压和操作过电压波头均为高频波，此时选用带少许延时的RCD就可避免这种误动作。

（3）根据剩余电流含有直流分量的动作特性分

1）AC型RCD。适用于交流正弦电流波，无论突然施加还是缓慢上升。

2）A型RCD。除AC型适用范围外，还适用于：剩余脉动直流电流；剩余脉动直流电流叠加0.006 A的平滑直流电流。有或没有相位角控制，与极性无关，无论突然施加还是缓慢上升。

3）B型RCD。除A型适用范围外，还适用于：至1 000 Hz的剩余正弦交流电流；剩余交流电流叠加0.4倍额定剩余电流（$I_{\Delta n}$）的平滑直流电流；剩余脉动直流电流叠加0.4倍额定剩余电流（$I_{\Delta n}$）或10 mA的平滑直流电流（两者取较大值）；下列整流线路产生的剩余直流电流：对于2极、3极和4极的RCD，线与线的两个半波桥式连

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接，对于3极和4极的RCD，3个半波星形连接或者6个半波桥式连接；剩余平滑直流电流。有或没有相位角控制，与极性无关，无论突然施加还是缓慢上升。

尽管国外厂商提供的样本上早已有这方面的资料，但这一分类对业内的同行而言，还是比较陌生的概念。通常选用的AC型RCD，只能检测正弦交流波电流。如果故障电流中含有直流分量，当直流成分流过互感器时，在互感器中产生稳定的磁感应强度，互感器的工作状态会从磁化曲线的线性段向非线性段移动，由此对互感器工作条件的影响是未可知的。当直流分量过量时，会造成RCD的拒动作。在交流电路中，当具有整流器件时，就可能产生直流分量。

GB 16895.24—2005 /IEC 60364－7－710：2002《建筑物电气装置第7－710部分：特殊装置或场所的要求医疗场所》中规定：在1类和2类医疗场所内装用RCD时，应按可能产生的故障电流波形选用最合适的A型或B型RCD。类似地，对其他重要场合与设备，在设计工作中同样应予以重点保护。

在电子产品大量使用的今天，设计人员接触应用的整流器件也越来越多，当配电回路里带有过多的整流设备时，应选用对直流分量不敏感的A型或B型RCD。文献[7]第10.7.9条明确规定：“用于计算机电源的插座应采用A型剩余电流动作保护装置”。

8 剩余电流动作保护器在不同接地型式中的应用

由于RCD在配电系统中应用广泛，在不同接地型式中，因地制宜地正确选用RCD就显得十分重要，否则不但不能很好地起到电击防护的作用，还可能造成额外的停电或其他系统故障。下面，就对各类接地型式下RCD的应用逐一进行分析说明。

（1）RCD在IT系统中的应用

IT系统因为自身的特点，发生一次接地故障时一般不要求切断电源，系统仍可继续运行，此时应由绝缘监视装置发出接地故障信号。当发生二次异相接地（碰壳）故障时，若故障设备本身的过电流保护装置不能在规定时间内动作，应装设RCD切除故障。因此，RCD的参数选择应使其额定剩余不动作电流$I_{\Delta no}$大于设备一次接地时的剩余电流，即电容电流；而额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$应小于二次异相故障时的故障电流。

（2）RCD在TT系统中的应用

TT系统由于靠设备接地电阻将预期触电电压降低到安全电压以下十分困难，而故障电流通常又不能使过电流保护电器可靠动作，因而RCD作为TT系统理想的接地故障保护装置，其设置就显得尤为重要。TT系统中RCD典型接线示例如图3所示。

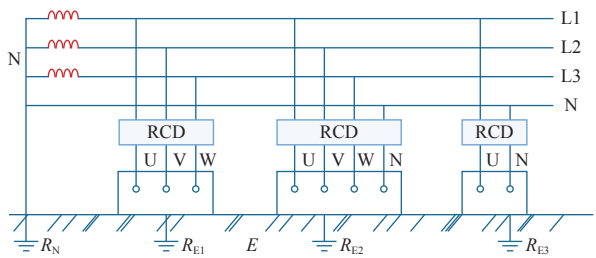


图3 TT系统中RCD典型接线示例

当所有设备都采用了RCD时，分别接地与共同接地都是可行的。若有的设备未安装RCD，则未安装的设备与装设RCD的设备不能采取共同接地方式。

TT系统的安全条件为$R_E I_a \leqslant 50$ V。I_a为在规定时间内使保护装置动作的电流，当采用RCD时，I_a即为$I_{\Delta n}$。TT系统中RCD额定剩余动作电流与设备接地电阻的关系如下表所示。从下表中可以发现，在TT系统中，RCD的使用使得接地电阻阻值

表 TT系统中RCD额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$与设备接地电阻的关系

额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$/mA	设备最大接地电阻/Ω
30	1 667
50	1 000
100	500
200	250
500	100
1 000	50

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的要求大大降低了。

（3）RCD在TN系统中的应用

尽管TN系统中的过电流保护在多数情况下都能在规定时间内切除故障，但即使在这种情况下，TN系统仍宜设置剩余电流保护。

一是因为在系统设计中一般不会（有时也不可能）逐一校验每台设备处发生单相接地时过电流保护是否能满足电击防护要求（即使校验也不一定准确，因为漏电点阻抗是未知的）；二是因为过电流防护不能防直接电击；三是当PE线或PEN线发生断线时，过电流保护对碰壳故障不再有作用。因此在TN系统中设置剩余电流保护，对补充和完善TN系统的电击防护性能及防漏电火灾性能有很大益处。

（4）TN－S系统中RCD的设置

TN－S系统中RCD典型接线示例如图4所示。

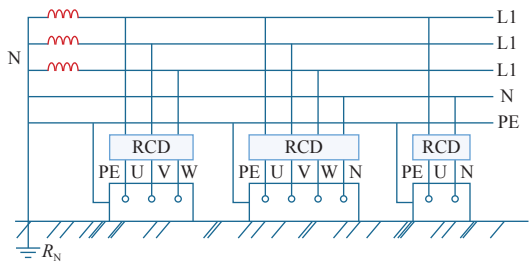


图4　TN－S系统中RCD典型接线示例

（5）TN－C系统中RCD的设置

严格地讲，TN－C系统是无法采用RCD的，因为PEN线在正常工作时有不平衡电流和3*n*次谐波电流会导致误动作，因而不能将其作为剩余电流通道。同时，发生碰壳故障时接地电流也通过PEN线，无法被当作剩余电流区分出来。所以TN－C系统必须改造成TN－S、TN－C－S系统或局部TT系统后，才能安装使用RCD。

9　结束语

低压配电系统中装设剩余电流动作保护装置是防止直接接触电击事故和间接接触电击事故的有效措施之一，也是防止电气线路或电气设备接地故障引起电气火灾和电气设备损坏事故的技术措施。通过本文对RCD的产生、发展、构造原理和主要功用等内容的叙述，阐述RCD的选用要求。面对不同场合、不同条件，合理选用相匹配的RCD，正确地安装及使用，才能充分发挥其功用。

参考文献

[1] 王厚余．低压电气装置的设计安装和检验 [M]．3版．北京：中国电力出版社，2012．

[2] 杨岳．电气安全 [M]．北京：机械工业出版社，2003．

[3] 中国航空工业规划设计研究院，等．工业与民用配电设计手册 [M]．3版．北京：中国电力出版社，2005．

[4] GB/Z 6829—2008 (IEC/TR 60755：2008，MOD) 剩余电流动作保护电器的一般要求 [S]．

[5] GB 13955—2005 剩余电流动作保护装置安装和运行 [S]．

[6] GB 16895.4—1997 (idt IEC 364－5－53：1994；IEC 364－5－537：1981) 建筑物电气装置第5部分：电气设备的选择和安装第53章：开关设备和控制设备 [S]．

[7] JGJ 16—2008 民用建筑电气设计规范 [S]．

[8] GB 50054—2011 低压配电设计规范 [S]．

[9] 王厚余．电子式RCD和电磁式RCD的选用 [J]．建筑电气，2010 (2)．

（收稿日期：2015－03－12）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net