低压电力系统的保护接地分析

从功能性接地和非功能性接地两方面解析了接地的作用及保护原理，说明了防止电击措施有多种，等电位联结只是其中使用最广泛、方便和经济的一种。需要注意的是：等电位联结能够有效防止电击，但是绝对的等电位是没有的，接地不等于等电位，等电位也不一定要接地；通过一定规则的接地是实现等电位最常用的方法。

王　勇　崔海明／中国航天建设集团有限公司

王　勇／研究员

关键词／Keywords
功能性接地·
非功能性接地·
等电位联结·
接触电压·
跨步电压·

0　引言

电气系统的接地是每个工程都要遇到问题，是电气设计师基本内容之一，但是为什么要做接地，如何做好接地设计，并不是所有设计师都十分明白，接地看似简单，其中包含很多基础理论知识，接地对电气系统安全和人身安全至关重要。

1　电击防护和接地故障保护的关系

GB 50054—2011《低压配电设计规范》增加了电击防护的内容，取消了接地故障保护，用间接接触防护中的自动切断电源的措施取代接地故障保护，突出电击防护淡化接地故障保护。但是认真分析，电击防护和接地故障保护其实是不同的两个概念。出现接地故障无论是电击或者不电击，无论是直接接触还是间接接触，保护装置都要动作，这是为了系统安全。而有效的电击防护无论故障保护动不动作，都要保证人或牲畜处于非危险的电气环境中。《低压配电设计规范》第5.2.2条规定，当接地故障导致接触电压大于50 V时应切断电源。那么这就意味着当接地故障导致接触电压小于50 V时，可以不切断电源。但是对于电力系统来说，接地故障电流大于一定值时，保护装置是必须要切断电源的，所以两者不能取代。接地故障保护，可以不需要等电位，当接地故障电流超过设定值，保护装置动作与跳闸。

电击防护目标是：即使出现单一故障，也不能让人处于受电击的危险环境之中。电击防护的措施总结起来就三种：防接触；等电位；限压限流。相比较这三种做法，等电位是最简单经济可靠的做法。等电位联结能够有效防止电击，但是绝对的等电位是没有的，等电位的程度与用电设备保护接地方式亦密切相关。

《低压配电设计规范》和《民用建筑电气设计规范》指导思想是以切断电源来实现电击防护的，从接地故障发生到切断电源这个期间，允许实际接触电压超过预期接触电压，可能造成电击事故，因此这种做法可靠性差。例如《低压配电设计规范》中第5.2.9条，给固定式电气设备配电末端线路接地故障切断电流时间允许5 s，经计算最小允许接触电压约85 V，而实际接地电压接近相电压220 V，接触电压最大值约等于接地电压，此值远大于允许值。这也说明：只要采用断电措施进行保护，电气设备金属外壳发生间接接触故障时，可能存在危险电压，满足这个要求保护接地的做法可以比较简单，甚至不需要等电位。而《电击防护》和《交流电气装置的接地设计规范》则是强调等电位联结，即

使采用切断电源也是在等电位基础上，也就是说无论何时都要保证实际接触电压低于预期允许接触电压来实现电击防护，因此可靠性高。电流通过人体或动物体而引起的生理反应称为电击。带电导体和大地之间意外出现导电通路称之为接地故障。电击和接地故障不是一回事，但都是不正常的，应采取措施加以防护。接地故障保护需要用电设备保护接地。1类设备电击防护的主要措施是等电位联结，也要求用电设备保护接地，由此可见电击防护和接地故障保护目的和作用不一样，但是其中有些措施是共同的，这就是下面要讨论的保护接地。

2 保护接地

接地分为功能性接地、非功能性接地和防雷接地。功能性接地包括工作接地、防静电接地和防干扰接地；非功能性接地包括保护接地、等电位联结和局部等电位联结。接地的内容很多，本文就保护接地进行分析。保护接地（安全接地）定义是：为电气安全，将系统、装置或设备的一点或多点接地。这里的电气安全包括设备装置及人身的安全。

2.1 保护接地和等电位的关系

等电位可以不接地、接地也未必就是等电位，但是通过合理的设置保护接地可以实现等电位。等电位目的是防止人身遭受电击；保护接地目的有两个：①当出现接地故障时提供电流通道以利于继电保护装置动作；②尽量实现等电位。因此，如何做好保护接地至关重要。GB/T 17045—2006《电击防护装置和设备的通用部分》第5.2.2条规定：“保护等电位联结系统应由以下部分中的一个、两个或多个适当组合构成：I类设备外露可导电部分应接到保护联结端子上；装置中的接地或不接地的等电位联结；保护（PE）导体；PEN导体；防护屏蔽；电源的接地点或人工中性点；接地极（包括用作均衡电位的接地极）；接地导体”。需要注意这里只是说保护等电位联结系统应由以上部分中的一个、两个或多个适当组合构成，并没有说由这些部分中的一个、两个或多个适当组合构成，就是等电位了。其实对于许多砖混式结构的房屋建筑，没有梁柱、基础里没有连续钢筋，甚至没有钢筋。建筑内电气设备即使按照以上的说法做了PE联结，设备外壳与人体站立的地面也不一定等电位，也是有可能受到电击的。等电位只是个概念，有没有实现等电位应以接触电压和跨步电压进行考量。

2.2 低压系统接地分类

低压系统接地分为TN、TT和IT。第一种代表变压器中性点接地（工作接地）方式，第二种代表用电设备外壳接地方式。T－直接接地；I－不接地；N－外壳与中性点金属连接；第一种决定电力系统的工作接地方式，第二种决定了设备的保护接地方式。高压系统只是说工作接地包含有效接地和非有效接地，而低压系统不仅表明电源侧工作接地，同时还表明了用户侧的保护接地。由于低压系统有中性线引出，因此，在分析计算时需考虑接地电流和接零电流，两者大小可能不一样。

高压系统的电气设备金属外壳都要求直接接地，低压系统设备金属外壳实质上也是要求直接接地。那么外壳接地是不是就能起到保护作用呢？回答是否定的，只有满足一定的条件才是安全的。

根据《交流电气装置的接地设计规范》推荐：短时间（15 s）内体重50 kg的人承受的最大交流电流有效值是$I_b=116/\sqrt{t}$（mA），体重70 kg的人承受的最大交流电流有效值是$I_b=157/\sqrt{t}$（mA）。长时间内作用在人身上的电压小于50 V（通过电流30 mA）是安全的。出现接地故障时人体是否安全，小电流接地系统按照长时间接触验算。大电流接地系统按照短时间接触验算。

1）保护接地。为电气安全，将系统、装置或设备的一点或多点接地。

2）接地电压。电气设备发生接地故障时，其接地部分与大地零电位点之间的电位差称之为接地电压。

3）转移电压。接地故障电流流过接地系统时，由一端与该接地系统连接的金属导体传递的接地系统对参考地之间的电位差。

4）接触电压。接地故障电流通过接地装置时，地表面形成电位分布，设备垂直距离2 m和地面水平距离1 m处之间的电位差。此处1 m处容易误导，设备往往距离其接地装置相当远，用接地线连接的设备外壳电位与接地装置一样，虽然人距离设备水平距离1 m，实际人与设备外壳的电位差应是人与接地装置之间的电位差，绝不是1 m的电位差。

5）跨步电压。接地故障电流通过接地装置在地面水平距离为1 m的两点之间的电位差。

人体能够承受的电压不仅与电流还与人体电阻有关，人体电阻变化范围很大，我国采用1.5 kΩ作为参考值，人体单脚接地等效金属圆盘电阻3ρ。按规范规定：在正常情况下，长时间作用于人体电压以工频50 V为限值。因此，是否危及人身安全均以能否在人身上产生工频50 V电压来讨论。

值得注意的是，接地电压和转移电压并不一定是作用在人身上的电压，通常用来校核电气设备绝缘的承压能力。但是在没有做电位均衡或等电位联结的场合，接地电压和转移电压可能就是作用在人身上的电压。接触电压和跨步电压则是来校核人体承受的电压。在做保护计算时，不仅要考虑接地故障的保护，还要考虑接地电压、转移电压、接触电压和跨步电压。

2.3 高压配电装置接地

由于开关站和变电所的进线电源一般是10 kV及以上的高压，亦有可能出现接地故障，所以有必要简单介绍高压配电装置的接地。高压电力系统的接地分为有效接地和非有效接地。

非有效接地系统向1 kV以下低压装置供电的高压配电装置的保护接地电阻$R \leqslant 50/I$且不应大于4 Ω，高压配电装置金属外壳的对地电压不得超过50 V。接触电压和跨步电压小于接地电压，自然满足安全性要求。非有效接地系统单相接地故障电流是线路电容电流，数值较小，所以一般容易做到。

有效接地系统向1 kV以下低压装置供电的高压配电装置的保护接地电阻$R \leqslant 2\ 000/I$。故障时接地电压允许值可达2 000 V，切除故障时间0.4 s，应该考虑均压措施。利用建筑物基础钢筋网进行均压并做等电位联结，不能满足要求时，尚需设置专用接地网并做等电位联结，确保接触电压和跨步电压在允许范围之内。

北京10 kV有效接地系统是按照小电阻接地系统设置，接地电流按300～500 A计算。在做开闭站和变电所设计时，应进行接触电压和跨步电压校核计算，尤其独立式的配变电所建筑面积小，基础钢筋接地体数量少，不一定能够满足要求，需要专门设置接地网进行电位均衡。

3 低压配电系统保护接地

接地故障保护主要关注的是接地电阻，理论上低压系统接地电阻从0.1～1 000 Ω都能够对接地故障有效保护，所以接地电阻的大小不是问题。但是高低压共用接地装置时，高压侧出现接地故障产生的过电压可能造成绝缘损坏，因此规定接地电阻不大于4 Ω。

电击防护主要关注的是接触电压。规范要求建筑物内的低压电气装置应采用总等电位联结系统，目的是尽量减小接触电压，在采用GB/T 17045—2006《电击防护装置和设备的通用部分》第5.2.2条规定的等电位措施后，仍然不能满足接触电压和跨步电压要求时，应采用电位均衡措施。

《交流电气装置的接地设计规范》第7.2.6条规定：高压为有效接地系统，低压采用等电位联结的TN系统可以和高压设备保护接地共用接地装置，TT、IT系统低压电源的中性点严禁与高压设备的保护接地共用接地装置。这里对IT系统的说法值得商榷，IT系统中性点本来就不允许接地，在采用等电位联结时，用电设备的保护接地与高压保护接地共用并无大碍。北京地区四环以内大部分10 kV高压电源已采用小电阻接地系统，做变电所设计时应引起注意。配变电所设在建筑内时，由

于高压配电设备和变压器的保护接地都要与建筑结构钢筋联结，低压配电装置等电位也要与结构钢筋联结，因此高低压接地装置无法分开，按该条规定低压只能采用TN系统，严重制约了配电方式的应用。例如由该变电所给室外路灯供电一般采用TT系统，按这个规定就不行了。《低压配电设计规范》第5.2.12条允许TN系统内采用局部TT系统也是个问题。那么分析一下如果采用高低压共用接地装置的TT系统做等电位联结，当高压侧接地故障时，低压用电设备端可能承受2 000 V左右的零地电压，工频应力电压(2 000＋U_0) V，在设备的绝缘耐压能满足要求时并无大碍。此时设备外壳没有带电，工频故障电压为零，不会有电击情况发生，所以该条规定亦值得商榷。

高压为非有效接地系统，低压采用等电位联结时，高压接地故障电流不大，产生的接地电压不高，用电设备绝缘一般都能满足要求，所以低压可以和高压设备保护接地共用接地装置，国内架空进出线的10 kV高压系统，相地电容较小，大多采用非有效接地系统。

3.1 TN系统

（1）TN系统接地型式

TN－S系统接地型式如图1所示。

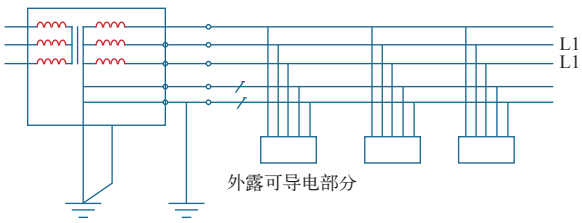

图1　TN－S系统

TN－C－S系统一种接地型式如图2所示。

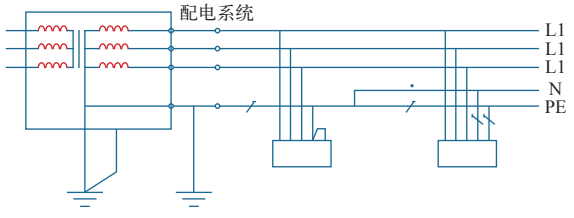

图2　TN－C－S系统在装置非受电点分开

TN－C－S系统另一种接地型式如图3所示。

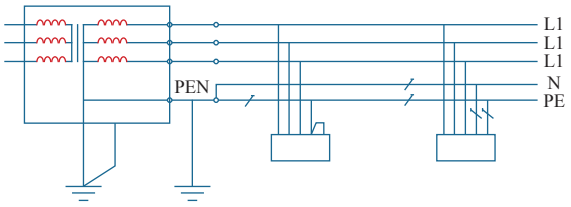

图3　TN－C－S系统在装置受电点分开

（2）TN系统接地型式特点

TN系统要求设备外壳与（变压器中性点）电源系统的接地点相连，此处隐含着要采用专线与中性点联结。这根专线与N线共用叫PEN线，不与N线共用叫PE线。PE线可以多点多处接地，但应接在共用的接地网上（共用接地系统）。专用PE线一般与回路相导线同管、同线槽敷设，或用同根电缆的其中一芯作为PE线，其目的是减小相线与PE线之间的距离，从而减少接地回路感抗，增大短路电流保证断路器或熔断器快速动作。

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定：

1）高压有效接地且低压系统采用等电位联结时，高低压接地系统可共用接地装置，接地电阻应满足$R\leqslant 2\,000/I_G$；且$R\leqslant 4\ \Omega$。

2）高压有效接地且低压系统没有等电位联结时，高低压不共用接地装置，高压配电装置和变压器保护接地电阻应满足$R\leqslant 2\,000/I_G$；$R\leqslant 4\ \Omega$低压系统接地电阻按工程条件研究决定（电力部门DL/T 621—1997规定为4 Ω）。

3）高压非有效接地变压器保护接地电阻应满足$R\leqslant 50/I$，低压系统采用等电位联结时，高低压接地系统可共用接地装置，$R\leqslant 4\ \Omega$。

低压单相接地故障时理论上接地电压最大是相电压220 V，与接地电阻大小无关。为保证人身安全，接触电压小于$U_t=(174+0.17\rho_s U_s)/\sqrt{t_s}$，跨步电压小于$U_s=(174+0.7\rho_s C_s)/\sqrt{t_s}$。由公式可知减少电击的办法包括：①增加表面电阻率$\rho_s$提高接触电压允许值；②由于接触电压$U_t=K_tV$，跨步电压$U_s=K_sV$，因此减少系数$K_t$、$K_s$可以减少实际电压值。

4）TN系统宜采用接地网的型式进行保护接

地，具体计算步骤：根据接地电阻和相电压求接地短路电流；根据接地网布置情况求分流系数；求接触电压；校核是否超过允许值；由于开关站（开闭所）没有变压器，用户端变电所的变压器高压中性点不接地，因此计算接地电压时只考虑内部接地故障流出地网的接地电流，不需要考虑外部接地故障流入的接地电流，需要考虑电缆屏蔽层和外护层的分流影响。

有效接地系统接触电压允许值$U_t=(174+0.17\rho_sU_s)/\sqrt{t_s}$；跨步电压允许值$U_s=(174+0.7\rho_sC_s)/\sqrt{t_s}$；接触电压计算值$U_t=K_tV$；跨步电压计算值$U_s=K_sV$。

网孔等距布置时：接触电压$U_t=K_mK_i\rho(I_G/l)$；跨步电压$U_s=K_sK_i\rho(I_G/l)$。

网孔不等距布置时：接触电压$U_t=K_{Tl}K_{Th}K_{Td}\cdot K_{Ts}K_{Tn}K_{Tm}V$；跨步电压$U_s=K_{Sl}K_{Sh}K_{Sd}K_{Ss}K_{Sn}K_{Sm}V$。

保护作用的原理：一般采用瞬动脱扣做短路保护，当出现单相接地故障时，短路电流通过专用的PE线和接地装置并联回路，流回变压器的中性点，由于专用线阻抗小只有几十毫欧，而TN系统的接地电阻一般4 Ω或1 Ω，所以总阻抗约等于PE导线阻抗，阻抗小短路电流大，有利于保护装置快速动作，切断电源。需要说明的是TN系统的单相接地短路电流不是入地电流。其中入地的电流并不大，因此接地电压不高，接触电压及跨步电压小于50 V，不会危及人身安全。

（3）TN系统接地型式存在问题

TN系统是以切断电源作为保护的主要手段，一旦PE线断线，且没有报警装置不易察觉，设备外壳处于不接地或TT接地状态，相地短路保护装置可能拒动作，接地故障点设备外壳接地电压接近相电压，接触电压和跨步电压有可能超过50 V，危及人身安全。

（4）解决办法

采取等电位联结措施。室内设备金属外壳与建筑物楼板、墙板内钢筋联结，以减少接触电压和跨步电压。室内的墙及楼板无钢筋结构或在室外安装设备时，应围绕设备四周设接地网，接地网上面用电阻率ρ较大的材料（沥青、砾石等）做地面，提高接触电压允许值，同时该接地网应与电源接地系统连接在一起。接触电压和跨步电压应做计算。

3.2 TT系统

（1）TT系统接地型式

TT系统两种接地型式如图4和图5所示。

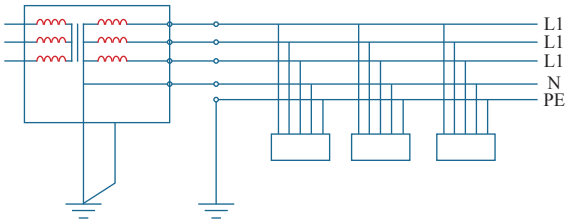

图4 TT系统接地型式1

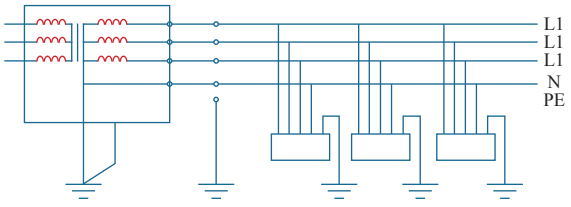

图5 TT系统接地型式2

（2）TT系统接地型式特点

TT系统强调设备外壳接地与电源接地接在不同的接地网（接地极系统）上。单相接地故障回路阻抗等于电源和设备侧接地电阻总和，接地电流比较大。可以通过检测接地电流的大小判断系统是否出现接地故障。保护装置瞬动脱扣能否动作应作校核，一般情况下这个接地电流不足以使保护装置的瞬动脱扣器动作。不满足要求时，保护装置需采用其他保护例如剩余电流保护器，零序保护器。

TT系统保护接地电阻应满足$R\leqslant 50/I_a$，其中I_a是保护装置动作整定电流（剩余动作电流），TT系统对接地电阻的要求并不是关键因素，因为故障时接地电压接近相电压，接触电压主要看分压系数，而影响该系数主要是接地方式及位置。

作用原理：TT系统故障时，由于电源与设备，设备与设备接在不同的地网上，一台设备或一组设备接地时，故障设备外壳电压接近相电压，其他设备组没有转移电压，从而保护的可靠

性得到增加。

（3）TT系统接地型式存在问题

由于TT系统没有直接连到变压器中性点的金属线路，设备处的地与变压器的地不是同一个，发生单相接地故障时，短路电流就是入地电流。故障点设备外壳对地电压有可能接近电源电压，因此设备处接地的装置的布置方式、位置及接地电阻等因素对分压系数有较大的影响，接触电压和跨步电压有可能超过50 V，危及人身安全。

另外规范允许设备单独或成组接地，但成组接地当其中一台设备故障时，有可能出现转移电压导致其他设备外壳的接地电压超过50 V。

（4）解决办法

采取等电位联结措施。室内成组设备金属外壳与建筑物楼板、墙板内钢筋联结，以减少接触电压和跨步电压。室内的墙及楼板无钢筋结构或在室外安装设备时，应围绕设备四周设接地网，网上面用电阻率ρ较大的材料（沥青、砾石等）做地面，提高接触电压允许值，同时该接地网应与电源接地系统连接在一起。接触电压和跨步电压应作计算。

3.3 IT系统

（1）IT系统接地型式

IT系统两种接地型式如图6和图7所示。

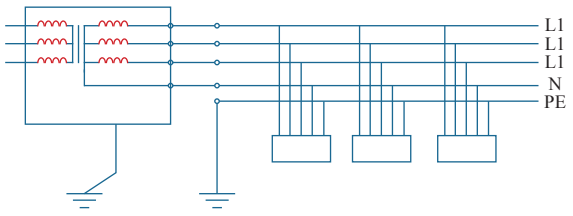

图6 IT系统接地型式1

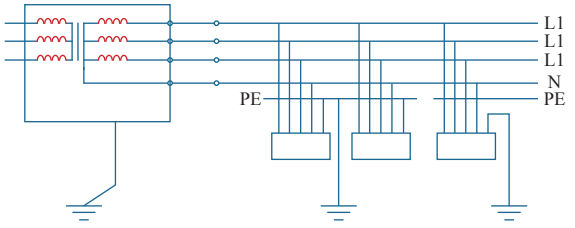

图7 IT系统接地型式2

（2）IT系统接地型式特点

IT系统电源中性点不接地，负载外壳接地。单相接地故障电流是线路的容性电流比较小，出现外壳碰相线可以在一定的时间内继续工作，提高了供电可靠性。IT系统电源中性点不建议引出中性线，但是可以引出中性线，不能与设备外壳相连。因为IT系统需要检测各相对地电压，一旦出现接地故障，故障相的对地电压为零，可以及时发现并加以处理。但是中性线的对地电压不容易检测，出现中性线碰壳故障难以发现，随着技术进步这一问题已得到解决。

作用原理：IT系统故障时，由于接地电流较小，在设备外壳接地情况下，一般接地电压小于50 V，可以保证人身安全。对IT系统接地电阻要求并不高，几十至几百欧姆都是安全的。

（3）IT系统接地型式存在问题

发生单相接地故障时，非故障相的对地电压接近线电压。由于IT系统发生单相接地故障时允许继续运行，因此设备的对地绝缘耐压值应作核定。在设备不做接地情况下，外壳电压是相电压，若人体接触故障设备外壳时，故障电流虽然很小却全部通过人体，一旦超过30 mA（线路对地电容大于0.43 μF时），亦有可能危及人身安全。

（4）解决办法

IT系统设备外壳应作接地处理。必要时采取等电位联结措施。室内成组设备金属外壳与建筑物楼板、墙板内钢筋联结，以减少接触电压和跨步电压。室内的墙及楼板无钢筋结构或在室外安装设备时，应围绕设备四周设接地网，网上面用电阻率ρ较大的材料（沥青、砾石等）做地面，提高接触电压允许值，同时该接地网应与电源接地系统连接在一起。接触电压和跨步电压应作计算。

4 TN、TT和IT系统接地故障接地电压分析

对于低压电源来说：理想电源相电压基本不变；负载相电压根据故障不同有较大的变化，最大可能接近线电压。相壳电压（应力电压）主要用于考核设备绝缘耐压性能，壳地电压（故障电

压）主要用来判断电击可能性，电击防护的量化指标是接触电压和跨步电压。当长期故障电压超过50 V时，就可能出现电击。故障电压不等于接触电压，虽然故障电压高于50 V，低压系统利用等电位联结（保护接地）仍可以将接触电压有效地控制在允许范围内，关键还是要看人和接地装置相对位置。

名词解释：相壳电压（工频应力电压）－相线对设备外壳电压；壳地电压（工频故障电压）－电气设备外壳对地电压；接地电压－电源故障点对地电压；U_f－故障电压；U_r－应力电压；U_0－相电压；U_e－线电压；I_g－高压接地电流；I_d－低压接地电流；R－低压接地电阻。

对于用户侧变电所，当高压为非有效接地系统时，高压接地故障电流较小，无论变电所高低压共用接地或不共用接地，接地电压和故障电压都比较小并容易控制。高压为有效接地系统时，高压接地故障电流大，变电所高低压共用接地和不共用接地，接地电压或故障电压会有较大的变化不容易控制，因此下面重点分析高压有效接地系统的接地电压和故障电压。

4.1 TN接地系统

TN系统变压器保护接地与低压中性点接地不共用接地装置如图8所示，共用接地装置如图9所示。

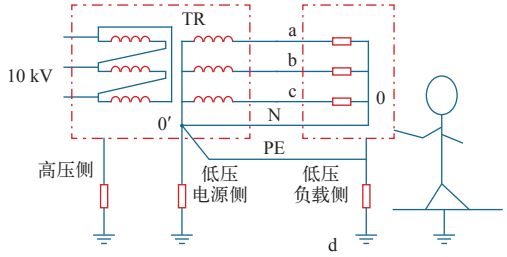

图8 TN系统变压器保护接地与低压中性点接地不共用接地装置

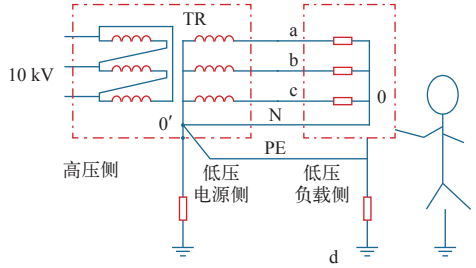

图9 TN系统变压器保护接地与低压中性点接地共用接地装置

1）高低压不共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

2）高低压共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_f+U_0$，用电设备绝缘耐压能力需验证。设备壳地电压（故障电压）$U_f=I_gR$，负载侧可能出现电击。需要做等电位联结将接触电压控制在允许范围以内。

3）低压侧电源接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=I_dR$，负载侧可能出现电击。需要做等电位联结将接触电压控制在允许范围以内。

4）低压侧负载接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r<U_e$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=I_dR$，负载侧可能出现电击。需要做等电位联结将接触电压控制在允许范围以内。

TN系统变压器中性点直接接地，变压器低压接地故障时短路电流很大，如果忽略变压器内阻，外壳接地电压接近相电压，应力电压接近线电压。接触电压主要看接地网布置型式和分流系数。尽管设备外壳接PE线也不一定安全。

4.2 TT接地系统

TT系统变压器保护接地与低压中性点接地不共用接地装置如图10所示，共用接地装置如图11所示。

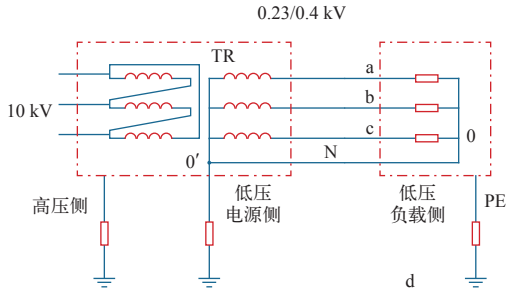

图10 TN系统变压器保护接地与低压中性点接地不共用接地装置

1）高低压不共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

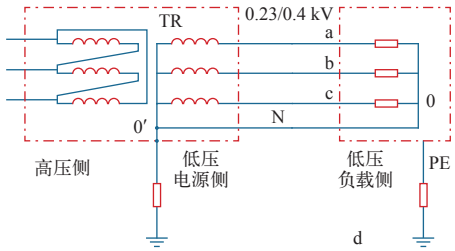

图11　TN系统变压器保护接地与低压中性点接地共用接地装置

2）高低压共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_f+U_0$，用电设备绝缘耐压能力需验证。设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

3）低压侧电源接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

4）低压侧负载接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r<U_e$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=I_dR$，负载侧可能出现电击。需要做等电位联结将接触电压控制在允许范围以内。

TT系统变压器中性点直接接地，负载外壳单独接地；变压器低压负载侧接地故障时短路电流不大，外壳接地电压小于相电压，应力电压接近线电压。接触电压主要看接地网布置型式和分流系数。

4.3 IT接地系统

IT系统变压器保护接地与低压保护接地不共用接地装置如图12所示，共用接地装置如图13所示。

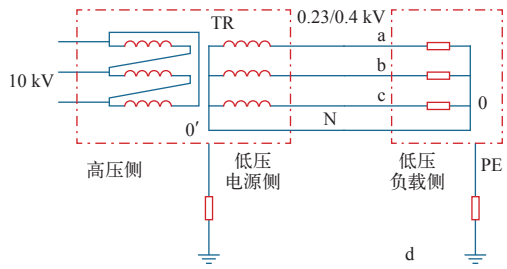

图12　IT系统变压器保护接地与低压保护接地不共用接地装置

IT系统变压器中性点不接地，变压器低压接地故障时短路电流小，接地电压小。

1）高低压不共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

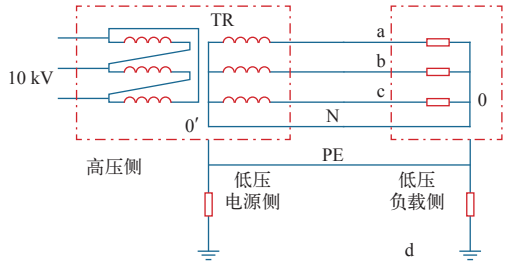

图13　IT系统变压器保护接地与低压保护接地共用接地装置

2）高低压共用接地装置，高压接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=0$，设备壳地电压（故障电压）$U_f=I_gR$，负载侧会出现电击。需要做等电位联结将接触电压控制在允许范围以内。

3）低压电源侧接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_e$，用电设备绝缘耐压能力需验证，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

4）低压负载侧接地故障时，设备相壳电压（应力电压）$U_r=U_e$，用电设备绝缘耐压能力需验证，设备壳地电压（故障电压）$U_f=0$，负载侧不会出现电击。

5　接地网设置及其电压分布特点

通过对TN、TT和IT系统分析，出现单相接地故障，无论保护装置是否拒动作，无论接地电阻多大，只要能够保证设备外壳与人所处的地做到等电位，就能够安全。最可靠的办法是地面下设金属网，设备外壳直接用金属导体与金属网连接。

《交流电气装置的接地设计规范》、《低压配电设计规范》、《民用建筑电气设计规范》和《电击防护装置和设备的通用部分》规范都要求等电位联结，且在规范附录中给出钢筋混凝土建筑物等电位的一些做法，但大部分没有钢筋混凝土的建筑物例如单层厂房、民宅和砖混结构的建筑等如何做到等电位联结介绍得甚少。

接地装置布置对接触电压、跨步电压的影响分析如下。由于金属导体的阻抗远小于地电阻的阻抗，因此工程设计接地电压计算时，为简化计算忽略接地金属导体本身阻抗的影响，换言之可

以认为接地金属导体上的电位是相等的，接地导体的泄漏电流是均匀分布的。

5.1 环形布置接地装置

环内中心电场强度$dE=\frac{\rho\lambda}{4\pi r^2}dl$，电势$dU=\frac{\rho\lambda}{4\pi r}dl$，其中$\lambda=\frac{I}{2\pi rn}$。

环中心电场强度$E=0$，环内最大电位差$U_{max}=\int_0^{2\pi r}\frac{\rho\lambda}{4\pi r}dl=\frac{\rho I}{4\pi rn}=\frac{\rho}{2}\lambda$。

5.2 直线型形布置接地装置

电场强度$E=\frac{\rho I}{\pi rl}U=\int_0^r\frac{\rho I}{\pi rl}dr=\frac{\rho I}{\pi l}=\frac{\rho}{2}\ln\frac{r_2}{r_1}$。

电位差$U=\frac{\rho}{\pi}\lambda\ln\frac{r_2}{r_1}$，其中$\lambda=\frac{I}{l}$。

5.3 电势及场强分析

分析上述公式可以看出：环形布置接地装置电压与接地导体的长度成反比，与电阻率和入地电流成正比。环中心电场强度最小，电势最大。直线型布置接地装置电压与接地导体的长度成反比，与电阻率和入地电流成正比，并与参考点至接地装置的垂直距离成正比。由于距离没有限制，可能很小也可能无穷大，因此没有明确具体的值，不好控制，最大值等于接地电压。

5.4 低压系统变压器中性点采用小电阻接地电压分析

事实上有许多电击事故是低压侧接地故障造成的。因此，对低压接地应引起重视，理论上低压系统变压器中性点经小电阻接地，故障时相零电压不变，不影响工作。由于串入小的接地电阻故障时限制了入地电流，从而减小接触电压容易实现电击防护，但串入的小电阻值应能保证发生接地故障时，保护装置可靠动作。接地电阻的功率应能满足故障时的热效应作用，相应的投资成本也会增大。小电阻接地的TN系统如图14所示。

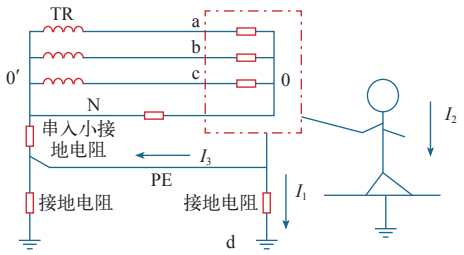

图14 小电阻接地的TN系统

6 结束语

低压电力系统保护接地是指正常情况下不带电的设备外露可导电部分和外部可导电部分的接地，其目的有两个：一是故障情况下电击防护（非功能性）；二是故障情况下提供电气通路，以利于保护装置可靠动作（功能性）。故障电击防护程度考核指标是接触电压和跨步电压，但是接触电压和跨步电压的计算以及如何设置接地有不少学问。本文从故障接地电压、接地网设置及其电压分布特点等方面作了分析。笔者认为目前一些规范标准中所说的等电位联结的做法，并没有实现真正的等电位，采用电位均衡才是降低接触电压有效措施。由于作者水平有限，望专家同行不吝赐教。

参考文献

[1] 《钢铁企业电力设计手册》编委会．钢铁企业电力设计手册(下册) [M]．北京：冶金出版社，2007.

[2] 中机中电设计研究院有限公司．GB 50054—2011 低压配电设计规范 [S]．北京：中国计划出版社，2012.

[3] 中国电力科学研究院．GB/T 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范 [S]．北京：中国计划出版社，2012.

[4] 中国建筑东北设计研究院．JGJ 16—2008 民用建筑电气设计规范 [S]．北京：中国建筑工业出版社，2008.

[5] 中国航空工业规划设计研究总院有限公司．工业与民用供配电设计手册 [M]．4版．北京：中国电力出版社，2016.

[6] 机械科学研究院．GB/T 17045—2006 电击防护装置和设备的通用部分 [S]．北京：中国标准出版社，2006.

[7] 水利电力部西北电力设计院电力工程电气设计手册 [M]．北京：中国电力出版社，2005.

（收稿日期：2017－08－20）EA