

过电压保护器综述

Overvoltage protector overview

孙丹峰¹, 季幼章^{1,2}

¹ 苏州市电通电力电子有限公司 苏州 250001

² 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031

摘要: 过电压保护器主要用于 35kV 及以下电力系统中, 用以限制雷电过电压、真空断路器操作过电压以及电力系统中可能出现的各种暂态过电压, 可有效地保护电动机、变压器、开关、电容器、电缆、母线等电力设备的绝缘不受损坏, 对相间和相对地的过电压均能起到可靠的限制作用。本文对过电压保护器采用氧化锌阀片串联间隙、四星形接法的工作原理, 保护性能, 可靠保护, 实际应用作了综述。

关键词: 过电压, 保护器, 综述

1 引言

随着真空断路器广泛应用, 避雷器在限制真空断路器操作过电压和避免受电设备绝缘损害方面存在原理性的缺陷, 因而产生了三相组合式过电压保护器。主要是针对常规避雷器的缺点而设计的具有独特联接方式和结构形式的过电压保护装置。三相过电压保护器与普通避雷器明显的区别是避雷器只能是相地保护, 三相组合式过电压保护器即可以相地保护也可以相间保护, 同时体积小, 可以安装在空间狭小的开关柜内。

三相组合式过电压保护器主要用于发供电企业和用电企业的供电系统, 用来保护变压器、开关、母线、电动机等电气设备。三相组合式过电压保护器不仅能防止雷击造成的过电压, 也能对各种操作过电压起到良好的保护作用, 不仅提供了相—地保护, 也能对相间过电压进行保护, 大大降低了相间过电压, 且伏安特性好, 无续流、无截波, 可靠性大大提高。而且易安装, 密封性强、耐振动, 可直接安装在开关柜的手车地盘或互感器室。

2 过电压保护器应用的由来

在发电厂以及冶金、化工、煤炭、石油等行业中, 由于高压电动机、电炉等设备运行起停频繁, 产生严重的操作过电压。由于操作过电压特别是相间过电压幅值较高, 使得厂用电系统事故频繁, 造成损失。通常供电系统采用氧化锌避雷器限制过电压, 但实际运行情况表明, 高压电动机和变压器绝缘仍旧时有击穿、相间闪络等事故也时有发生。这是因为: 无论是无间隙的避雷器还是带串联或并联间隙的避雷器, 其接线方式多为星形接线, 而操作过电压主要产生在高压电动机、变压器的相与相之间, 所以各

种形式的避雷器对于相间的绝缘不能进行很好的保护。

常规的避雷器由于考虑自身的安全, (1) 直流 1mA 参考电压 U_{1mA} 一般选值较高, 从而使残压过高。这样就使得避雷器过高的残压与被保护设备的绝缘水平配合不当, 因此避雷器保护高压电动机对地绝缘作用比较勉强。(2) 避雷器的持续运行电压选值偏低, 仅为相电压, 因而在中性点非有效接地系统中避雷器在单相接地时损坏较多, 这样又增加了系统的事故, 如果将避雷器的持续运行电压选为线电压, 又使避雷器的 U_{1mA} 值及残压更高, 达不到保护特性不能降低的要求。

本文介绍一种带串联间隙并采用四星形接法的三相组合式过电压保护器, 对相间和相地均能起到保护作用, 而且自身又可安全可靠地运行。经实际运行表明, 效果十分明显。

3 常规避雷器的缺点

避雷器中氧化锌阀片的伏安特性如图 1 所示。在图 1 中, U_{1mA} 为直流 1mA 参考电压, U_{100A} 为避雷器中流过 100A 操作冲击电流时的残压, U_c 为避雷器的持续运行电压。

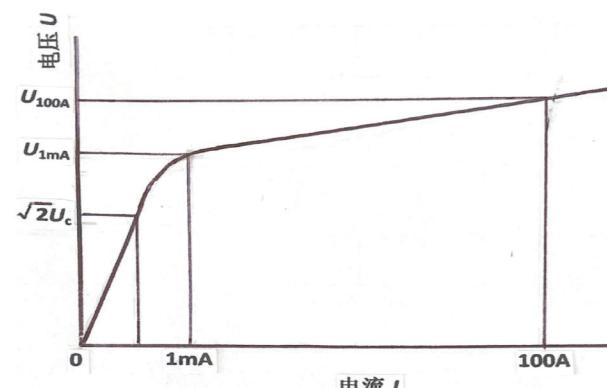


图 1 氧化锌非线性电阻片的伏安特性

电路保护元件

氧化锌非线性电阻的残压比定义为：

$$K_1 = U_{100A} / U_{1mA} \quad (1)$$

在通常情况下，制造水平较高的氧化锌非线性电阻的残压比 $K_1 \approx 1.4$ 。

氧化锌线性电阻的荷电率可表示为：

$$K_2 = \sqrt{2}U_C / U_{1mA} \quad (2)$$

荷电率是表征氧化锌阀片在某一电压下长期运行的寿命指标。如果 $K_2 = 0.75$ ，则氧化锌阀片可在 $0.75U_{1mA}$ 的电压下长期运行。根据 IEC 标准，氧化锌非线性电阻的寿命指标是这样确定的，将氧化锌阀片置入 115°C 加速老化箱中，外加 $U_C = 0.75U_{1mA}/\sqrt{2}$ 的电压，测其初始漏电流 I_{oh} 。如果 $I_{1000h} \leq 2I_{oh}$ ，则认为该阀片在常温下、荷电率 $K_2 = 0.75$ 时可运行 100 年。通常制造水平高的氧化锌阀片 $K_2 = 0.8$ ，而在设计使用中一般取 $K_2 < 0.8$ 。

(1) 额定电压和持续运行电压选值偏低

根据国标 GB11032-2000《交流无间隙金属氧化物避雷器》，6kV 系统保护电动机的避雷器持续运行电压 $U_C = 4\text{kV}$ ，直流 1mA 参考电压 $U_{1mA} \geq 11.3\text{kV}$ 。对于 6kV 电动机其相对地和相对相之间的绝缘所能承受的过电压值为：

$$U_R = \sqrt{2}(2U_s + 1) \times 0.75 \times 1.15 \quad (3)$$

式中 U_s —系统额定电压

常规的避雷器相对地 100A 操作冲击电流时残压可由(1)式求出，将 $U_s = 6\text{kV}, K_1 = 1.4, U_{1mA} = 11.3\text{kV}$ 代入(3)和(1)式可以求得

$$U_R = 15.9\text{kV}, U_{100A} = 15.8\text{kV}.$$

通常开关开断截流和多次重燃时相间过电压为对地过电压 1.5 倍，而开关三相同步开断截流时相间过电压为对地过电压的 2 倍。由于常规的避雷器是星形接法，其相对相之间的 100A 操作冲击电流的残压为

$$U_{\text{相间}} = U_{100A} \quad (4)$$

从上面可以看出，由于 U_{100A} 与 U_R 相当，因此常规的避雷器对高压电动机相对相绝缘保护作用比较勉强。又由于 $U_{\text{相间}}$ 远大于 U_{100A} ，所以对相与相之间绝缘则完全不能进行保护。

(2) 荷电率过高

避雷器也存在荷电率过高的问题。对于 6kV 系统的避雷器，国家标准规定其持续运行电压为相电压的有效值，即 $U_C = U_s \times 1.1 / \sqrt{3} = 4\text{kV}$ 。将 $U_C = 4\text{kV}$ 代入荷电率公式(2)可得 $K_2 = 0.5$ ，这样的荷电率是可以长期运行的。如果发生单相接地，作用在健全相的避雷器上所承受的持续运行电压的 $\sqrt{3}$ 倍相电压，甚至更高。此时荷电率 K'_2 为：

$$K'_2 = \sqrt{2} \times \sqrt{3}U_C / U_{1mA} \quad (5)$$

将 $U_C = 4\text{kV}, U_{1mA} = 11.3\text{kV}$ 代入上式可以得到 $K'_2 = 0.95$ 。如此高的荷电率 MOA 是承受不了，因此常规的避雷器必然在单相接地或谐振时产生过电压情况下损坏较多。

根据上面的分析可以看出，常规的避雷器由于其额定电压和持续运行电压选值偏低，在一些情况下不仅不能起到保护设备的作用，反而增加了电力系统的事故。如果将避雷器的持续运行电压 U_C 提高到线电压，虽然避雷器本身的安全性得到了提高，但也大大提高了相对地和相对相的电压保护值。以 6kV 为例，如果 U_C 选为线电压，根据上面的公式可以求出在 $K_1 = 1.4, K_2 = 0.75$ 的情况下 $U_{100A} = 20\text{kV}, U_{\text{相间}} = 40\text{kV}$ ，如此高的电压保护值根本不能保护电动机的绝缘。

4 提高避雷器的保护性能

(1) 提高氧化锌阀片的制造水平

首先考虑提高氧化锌阀片的制造水平来解决问题，假定将氧化锌阀片的制造水平提高到目前的最高水平，即取 $K_1 = 1.27, K_2 = 0.85$ 。此时保护比 K 则为：

$$K = K_1 / K_2 = U_{100A} / \sqrt{2}U_C \quad (6)$$

由上式可求出避雷器相对地 100A 操作冲击电流时残压的幅值为：

$$U_{100A} = \sqrt{2}KU_C \quad (7)$$

相对相之间 100A 操作冲击电流的残压值幅值可由(4)式求得。

上面已指出，当发生单相接地时避雷器上承受的持续运行电压为 $\sqrt{3}$ 倍的相电压。以 6kV 系统为例，当发生单相接地时持续运行电压为 $U'_C = U_C = 7.6\text{kV}$ 。将 U'_C 取代(7)式中的 U_C 并取 ZnO 阀片的最高制造水平即 $K = 1.5$ ，从(7)式可得相对地之间的操作冲击电流残压为 $U_{100A} = 16\text{kV}$ ，再由(4)式可求出相对相之间残压为 $U_{\text{相间}} = 32\text{kV}$ ，都超过了电机绝缘所允许的值 $U_R = 15.9\text{kV}$ 。

由此可见，提高氧化锌阀片的制造水平不能解决问题，应当改进避雷器结构，充分利用氧化锌阀片的特性。

(2) 加装间隙给阀片分压

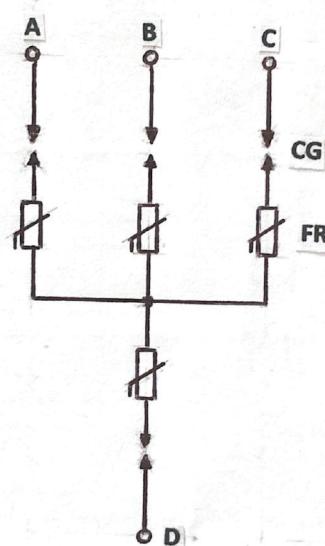
在目前氧化锌阀片生产水平下，真正要降低保护残压，实现对操作过电压的有效保护，只能是加装间隙给阀片分压。这样做，一方面降低了保护残压，起到了对操作过电压的保护作用，另一方面又不降低持续运行的电压值，保护器自身的安全性有保障。

不过加间隙不是万能的。为了避免过压保护器在系统间歇性弧光接地过电压和谐振过电压，这些能量远远超出过压保护器能承受范围的过电压下误工作，致使过压保护

器自身出现事故，间隙的工频放电电压不能设置得过低。过压保护器间隙与阀片互为保护，按保护间隙的折算原则，氧化锌阀片直流 1mA 参考电压值不宜低于间隙工频灭弧电压的 2 倍，否则阀片不能起到保护间隙的作用，所以间隙放电电压有下限意味着阀片残压控制也有下限，不能一味的作降低残压设计。

(3) 四星形接法组合式结构

要改进避雷器的结构，必须寻求另外的途径。带串联间隙的避雷器因间隙存在，阀片无荷电率问题，不存在荷电率 K_2 ，因而 $K = K_1/K_2$ 不成立。因为间隙的存在仅有残压比 K_1 的问题，残压 U_{100A} 原则上可随 U_{1mA} 任意选取。国外生产的带串联间隙的避雷器达到 $U_{100A} = 15\text{kV}$ ，但其相间电压为 30kV 。为了使 $U_{100A} = U_{\text{相间}}$ ，除了加串联间隙还必须改变避雷器的接线方式，即将传统的星形接法改为四星形接法。图 2 示出四星形接法组合式过压保护器原理图。



CG—间隙 FR—ZnO 电阻
图 2 四星形接法组合式过压保护器原理图

一种新型的带串联间隙的组合式过压保护器，由四个带放电间隙的氧化锌非线性电阻单元构成，采用组合式结构并以四星形方式联接。图 2 中 FR 为氧化锌非线性电阻和电容，CG 为放电间隙。由于过压保护器是对称结构，因此其中的任意三个端子可分别接入 A、B、C 三相，另一个端子接地线。设置公共中性点，实现对相间过电压的快

速响应。采用这种特殊的结构和接线方式，使得相间过电压大为降低，提高了保护性能。现场使用情况也表明，过压保护器解决了用电系统中的操作过电压问题。表 1 示出了过压保护器的主要参数。

表 1 过压保护器的主要技术参数

| | | | | |
|---------------------------------|-----|------|------|------|
| 系统额定电压 (kV) | 有效值 | 3 | 6 | 10 |
| 电动机额定电压 (kV) | | 3.15 | 6.3 | 10.5 |
| 避雷器持续运行电压 (kV) | | 3.8 | 7.6 | 12.7 |
| 工频放电电压 (不小于) (kV) | 峰值 | 5.2 | 10.5 | 17.5 |
| 直流 1mA 参考电压 (不小于) (kV) | | 4.9 | 10 | 16.5 |
| 1.2μs/50μs 冲击放电电压及残压 (不大于) (kV) | | 8.5 | 15.6 | 25.5 |
| 500A 操作冲击电流残压 (不大于) (kV) | | 7.4 | 15 | 24.8 |
| 5000A 雷电冲击电流残压 (不大于) (kV) | | 8.8 | 18 | 28.8 |
| 安全净距离 (不小于) (mm) | | 100 | 130 | 130 |
| 相地绝缘沿面爬电距离 (不小于) (mm) | | 200 | 200 | 250 |

5 过压保护器工作原理与特点

(1) 组合式过压保护器由四个放电间隙和氧化锌非线性电阻及电容串联的单元组成。过压保护器工作原理：

过电压保护器选用阻燃、耐老化的硅橡胶做外壳材料，从内部引出四根硅橡胶高压电缆和氧化锌阀片整体硫化一次模压成形，除四个线鼻子为裸导体外，其他部分被绝缘体封闭，过电压保护器采用放电间隙给氧化锌阀片分压的方式，降低产生的操作冲击保护残压，实现对操作过电压的保护。而且过电压保护器接入电网后，有利于破坏谐振条件，电阻产生阻尼震荡，有利于降低谐振过电压幅值。

① 过电压保护器相间过压保护原理：过电压保护器当 A、B、C 三相中，任意两相发生过电压时，P1、P2、P3 中保护单元中的相应两相则通过各自的间隙组件两两并联后，再通过 P4 放电保护，过电压保护器的氧化锌阀片导通限压，过电压消失后，因氧化锌阀片的泄漏电流很小，放电间隙组件自动恢复。

② 过电压保护器相对地过压保护原理：当 A、B、C 三相中，任意一相与地发生过电压时，P1、P2、P3 保护单元中的相应一相和接地相 P4 之间通过各自的间隙组件串联放电保护。

(2) 组合式过压保护器特点

① 采用四星式接法，保护范围广，即可保护相对地绝

电路保护元件

缘，还可保护相间绝缘。可以限制大气过电压、各类操作过电压，还有效限制相间和相地的过电压；

② 由于有间隙，在正常运行情况下与系统有效隔离，使氧化锌阀片的荷电率为零，电容器不会向系统提供电容电流，也不受电网中谐波的影响；

③ 在系统发生较高谐振过电压时，由于间隙击穿，在电网中突然接入电容，破坏了谐振条件阻止了振荡，有利于消除谐振过电压；

④ 组合式过压保护器将阻容吸收器和避雷器有机的结合在一起，具有阻容吸收器和避雷器的双重功能；

⑤ 与阻容吸收器相比，具有明确的残压值，可有效限制操作过电压幅值，将设备中大量的电磁能量泄放到大地中，解决了RC通流容量小的问题，有效地保护了电气设备；

⑥ 阻容吸收有效地降低了过电压波头的上升陡度，降低了振荡频率，解决了避雷器对高频过电压信号响应速度较慢而起不到保护电气设备绝缘的问题，电阻的接入有效阻尼和衰减了过电压振荡；金属氧化物避雷器则发挥通流容量大的优点，解决了阻容吸收器不能承受较大能量的冲击而损坏的缺陷；

⑦ 不会向电网提供附加的接地电容电流，所以在确定电网中性点接地方式时，不必考虑组合式过压保护器的电容影响；

⑧ 采用特殊氧化锌电阻，通流容量大，2ms方波冲击电流800A。

6 过压保护器的保护性能分析

6.1 与常规的避雷器相比较

(1) 氧化锌阀片和放电间隙互为保护

在过压保护器中采用氧化锌阀片和放电间隙串联的结构，使两者互为保护。放电间隙使氧化锌阀片的荷电率为零，不存在老化问题。氧化锌阀片良好的非线性伏安特性又使间隙放电后立即熄灭，无续流、无截波，放电间隙不再承担灭弧任务，提高了过压保护器的使用寿命，在操作过电压下，动作寿命可达 10^5 次以上。

(2) 一个间隙结构简单

带串联间隙的过压保护器由于充分利用了氧化锌阀片的优点，间隙无需灭弧，因此只需一个间隙而且结构简单。一个间隙的结构使间隙分散度大的问题得到解决，一般由制造误差引起的分散度在10%以内。另外，单间隙使放电值不再受外壳环境因素变化的干扰，放电电压分散度在5%以内。

(3) 电压冲击系数接近于1

过压保护器通过改善间隙的结构以及选择间隙之间瓷环材料的介电系数，使得电压冲击系数接近于1，也就是上升前沿为 $1.2\mu s$ 的冲击电压放电值和上升前沿为5ms的工频电压放电值一致。这样，在操作冲击电压波形范围内($20\mu s \sim 50ms$)的任意波形电压，放电电压值均相等，不受操作过电压类型影响，过电压保护值准确，保护性能优良。

(4) 采用四星形接线方式，降低相间过电压

过压保护器采用四星形接线方式，可将相间过电压大大降低，与常规的避雷器相比，相间过电压下降了60%~70%，保护的可靠性大为提高。另外，相对相、相对地保护电压值低，可将操作过电压可靠地限制在被保护设备的绝缘允许范围内，而且在单相接地、间隙性弧光接地和谐振过电压下可长期安全运行。

6.2 与阻容过电压吸收器相比较

目前国内在某些场合也采用阻容过电压吸收器来限制操作过电压，阻容过电压吸收器的优点是能缓和过电压波头的陡度。阻容过电压吸收器的缺点是无明确的过电压限制值且吸收过电压的能量太小。

阻容过电压吸收器在过电压时吸收的能量为：

$$W_C = 1/2[C(U^2 - U_0^2)] \quad (10)$$

式中 U_0 —初始电压

U —限制电压

对于本文所述的四星形接法的过电压保护器，其过电压吸收能量为：

$$W_Z = U \times I_t$$

式中 I_t —2ms方波通流量

现假定限制电压 U 为 15kV，忽略阻容过电压吸收器的初始电压 U_0 并设 $C = 0.1\mu F$ ，氧化锌阀片的电流为400A，由此可得出 $W_C = 11.25J$, $W_Z = 12000J$ 。阻容过电压吸收器吸收的能量远小于过压保护器吸收的能量，如此小的 W_C 不能满足限压的要求，较小的开关截流值将引起电容器上的充电电压超过限制值，在这一方面过压保护器显然优于阻容过电压吸收器。

7 结论

(1) 过压保护器中使用了氧化锌阀片和间隙，两者互为保护。阀片存在老化问题，间隙使其荷电率为零，减弱老化，提高使用寿命。间隙在续流时易损坏，ZnO阀片使其无续流，两种元件发挥各自优点。

(2) 过压保护器采用四星形接线方式，相间过电压大大降低，与常规避雷器相比，相间过电压下降了60%~

下转24页