

避雷器和浪涌保护器的比较

Comparison of Lightning Arrester and Surge Protection Device

孙丹峰¹, 季幼章^{1,2}

Sun Danfeng¹, Ji Youzhang^{1,2}

1. 苏州市电通电力电子有限公司 (苏州, 215011)

2. 中国科学院等离子体物理研究所 (合肥, 230031)

1 Suzhou Eleston Power Electronics Co., Ltd (Suzhou, 215011)

2 Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences (Hefei, 230031)

摘要: 本文综述了避雷器的工作原理、基本要求、类型和氧化锌避雷器的电器特性, 以及浪涌保护器的工作原理、基本元件、分级保护和主要电器特性。对避雷器和浪涌保护器作了比较。

关键词: 避雷器 浪涌保护器 比较

Abstract: This paper introduces the operating principle, basic requirements and types of the arrester, the electrical characteristics of zinc-oxide arrester, and the operating principle, basic elements, grading protection and main electrical characteristics of SPD (surge protection device), comparing the arrester with SPD.

Key words: Arrester, SPD, Compare

[中图分类号] TM86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 02-0029-12

《电源世界》投稿: editor@cps800.com

1 引言

避雷器是用来保护电力系统中各种电气设备免受雷电过电压、操作过电压、工频暂态过电压冲击而损坏的一个电器元件。

浪涌保护器是把窜入电力线、信号传输线的瞬时过电压限制在设备或系统所能承受的电压范围内, 或将强大的雷电流泄流入地, 保护被保护的设备或系统不受冲击而损坏。

本文综述了避雷器的工总原理、基本要求、类型和氧化锌避雷器的电气特性, 以及浪涌保护器的工作原理、基本元件、分级保护和主要电气特性。对避雷器和浪涌保护器作了比较。

2 过电压

过电压是指超过正常运行电压并可使电力系统绝缘或被保护设备损坏的电压升高。过电压通常可分为三大类: 暂时过电压、操作过电压、雷电过电压^[1]。

暂时过电压、操作过电压是由于电力系统中断路器的操作或系统故障, 使系统参数发生变化, 由此引起系统内部能

量转化或传递而产生的过电压, 统称为内部过电压。

2.1 操作过电压

操作过电压即电磁过渡过程中的过电压, 一般持续时间在 0.1s 内。在中性点直接接地系统中, 常见的操作过电压有: 合闸空载线路过电压、切除空载线路过电压、切除空载变压器过电压以及解列过电压等。以合闸 (包括重合闸) 过电压最为严重。在中性点非直接接地系统中, 主要是弧光接地过电压。

2.2 暂时过电压

暂时过电压包括工频电压升高和谐振过电压, 持续时间相对较长, 暂时过电压的产生原因主要是空载线路的长线路的电容效应、不对称接地故障、负荷突变以及系统中发生的线性或非线性谐振等。暂时过电压的严重程度取决于其幅值和持续时间, 在超高压系统中, 工频电压升高具有重要影响, 因为: (a) 暂时过电压的大小直接影响操作过电压的幅值; (b) 它的数值是决定避雷器额定电压的重要依据; (c) 它的持续时间长, 工频电压升高可能危及设备的安全运行。

2.3 雷电过电压

雷电过电压分为3种。

(1) 感应过电压

在输电线路附近发生雷云对地放电时，线路上产生的过电压。这种过电压在极少的情况下才达到500kV~600kV，因此只对35kV及以下电网有危害。

(2) 雷击导线、绕击时的过电压

直击雷过电压在没有避雷线的情况下发生，但有避雷线时仍有可能绕过避雷线而击于线路上，成为绕击，但其概率较小。

(3) 雷击避雷线或杆塔时引起的反击

雷击杆塔时由于杆塔的电感和接地电阻，使本来是地电位的杆塔具有很高的电位，引起绝缘子逆闪，将高电位加到导线上。

对于220kV及以下电力系统，绝缘水平一般由大气过电压决定。其保护装置主要是避雷器，以避雷器的保护水平为基础决定设备的绝缘水平，并保证输电线路有一定的耐雷水平。对于这些设备，在正常情况下应能耐受内部过电压的作用，因此，一般不专门采取针对内部过电压的限制措施。

随着电气等级的提高，操作过电压的幅值将随之提高。所以，对330kV及以上的超高压系统，操作过电压将逐渐起到控制作用，一般采取专门限制内部过电压的措施。

3 避雷器

3.1 避雷器工作原理

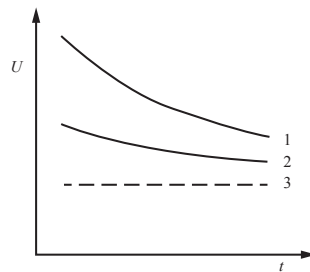
避雷器是变电站保护设备免遭雷电冲击波袭击的设备。当沿线路传入变电站的雷电冲击波超过避雷器保护水平时，避雷器首先放电，并将雷电流经过良导体安全引入大地，利用接地装置使雷电压幅值限制在被保护设备雷电冲击水平，使电气设备受到保护^[1,2]。

避雷器的基本要求如下。

(1) 具有良好的伏秒特性，以易于实现合理的绝缘配合绝缘强度的配合中，对避雷器伏秒特性的要求不仅要位置低，而且形状平坦。通常用冲击系数来反映伏秒特性的形状。冲击系数是指冲击放电电压与工频放电电压之比。其比值愈小，伏秒特性愈平坦。避雷器伏秒特性的上限应高于电气设备伏秒特性的下限。图1示出避雷器与电气设备的伏秒特性匹配图。

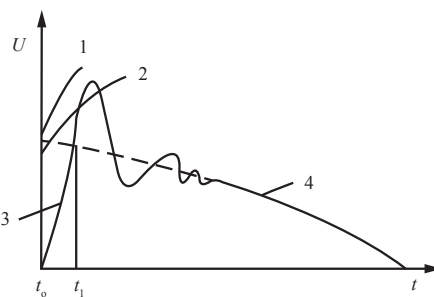
(2) 应有较强的绝缘自恢复能力，以利于快速切断工频续流。避雷器一旦在冲击放电电压作用下放电，就造成系统对地短路。此后雷电过电压虽然过去，但工频电压仍持续作用在避雷器上，工频续流以电弧放电的形式出现。避雷器应当具有自行切断工频续流恢复绝缘强度的能力，要求避雷器间隙绝缘强度的恢复程度高于避雷器上恢复电压的增长程度，使电力系统能够继续正常运行。图2示出避雷器间隙绝缘强

度恢复程度与避雷器恢复电压程度图。



- 1-- 电气设备的伏秒特性；2-- 避雷器的伏秒特性
3-- 电气设备上可能出现的最高工频电压

图1 避雷器与电气设备的伏秒特性配合



- 1-- 绝缘强度恢复高于避雷器恢复电压；
2-- 绝缘强度恢复低于避雷器恢复电压；
3-- 避雷器恢复电压；4-- 工频电压

图2 避雷器间隙绝缘强度恢复程度与避雷器恢复电压增长程度

3.2 避雷器分类

3.2.1 按产品外护套分类

(1) 瓷套式

以电瓷作为外绝缘，现基本处于淘汰中，只有少数城市应用。

瓷套式特点是较经济，耐腐蚀。但存在易破损、笨重、接地端焊接点易脱落、密封性能不好、耐污秽性差，需每年维护一次、易爆、故障时对周围的人身和设备安全隐患大等缺陷。

(2) 有机外套式

采用硅橡胶或乙丙橡胶作为外绝缘护套。有机外套式特点是电气性能和理化性能优异、安装轻便容易、耐污秽、耐腐蚀、耐气候能力强，使用寿命较长，故障易发现且周边危害小，五年免维护。

其中有机外套也称作复合外套，多数用硅橡胶作为避雷器的绝缘外套，少量采用乙丙橡胶，特点是硅橡胶具有良好的憎水性，表面污秽层的积累速度较慢、耐气候老化，耐电蚀损、耐污秽性能好。

3.2.2 按产品限流元件分类

(1) 碳化硅电阻片

较早时期所使用，现基本淘汰，一般采用瓷外套和火花间隙。电性能差，通流能力较低。

(2) 氧化锌电阻片

其通流能力约为碳化硅电阻片的4倍，可以连续多次动作，对雷电过电压和操作过电压都可以进行保护。对陡波具有良好的响应特性，伏安特性平缓，使电气设备绝缘受较高过电压作用的概率减小。

随着氧化锌阀片的技术性能提高，氧化锌避雷器优良的保护性能已被人们接受，近年来广泛地应用于电气设备过电压保护。

氧化锌避雷器保护范围较小，只能保护附近的电气设备免受雷害。

3.2.3 按产品结构分类

(1) 有间隙型

分内间隙型和外间隙型，当过电压击穿空气间隙时，避雷器动作接地。

有间隙型的特点是一旦电阻片击穿，不会造成单相死接地。内间隙型产品由于有空气间隙的存在，所以存在爆炸和容易产生呼吸效应进潮；而且一旦阀片击穿或接地端焊点脱落、瓷套未爆时外观无变化，巡线不易发现，此时失去避雷器保护。

(2) 无间隙型

瞬间动作响应，动作电压高，供电质量高，不易爆。因为没有间隙，避雷器动作与否完全取决于加于其端部的电压高低，遇有谐振过电压时，多只避雷器可以同时动作，加大系统的阻尼，从而可以抑制某些谐振过电压的形成。

3.2.4 按产品用途分类

(1) 配电型

应用在配电线路中，一般安装在电缆终端和变压器上。

(2) 电站型

一般用在变电站出线(母线)和高压开关柜内。

(3) 电容型

用于电容器的过电压保护。

(4) 电机型

用于大型电动机、发电机等，预防操作过电压较大且较频繁。

(5) 线路型

通常用在35kV及以上输电线路中。

(6) 环网柜用

高压侧为端子连接或插拔连接。

(7) 中性点接地型

用在变电站35kV及以上主变压器的中性点上。

(8) 电气化铁道型

铁路电网用。

3.3 避雷器的基本类型

3.3.1 保护间隙型

是一种最原始、最简单的避雷器，它由主间隙和辅助间隙串联而成，辅助间隙是为了防止主间隙被外物短路误动作而设计的。主间隙的两个电极做成角形，可以使工频续流电弧在自身点电动力和热气流作用下易于上升被拉长而自行熄弧。图3示出保护间隙原理图。

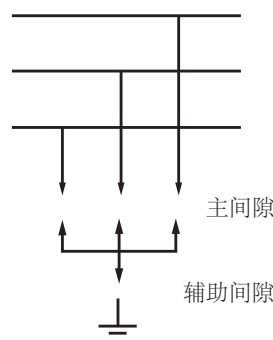


图3 保护间隙原理图

保护间隙缺点：灭弧能力差，只能熄灭中性点不接地系统不大的单相接地短路电流。但在两相或三相保护间隙同时动作，或中性点直接接地情况下，流过保护器的电流是短路电流，其值很大，间隙电弧不能自行熄灭，而引起断路器跳闸，一般应有自动重合闸加以配合。而且间隙动作后，引起很陡的截波，严重威胁变压器等有绕组的电气设备。图4示出保护间隙动作后的过电压波形图。

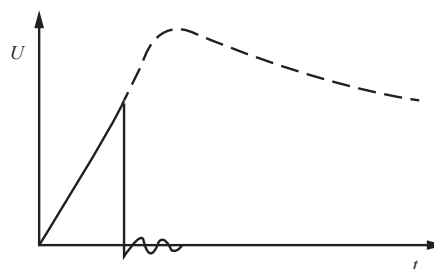


图4 保护间隙动作后的过电压波形

3.3.2 排气式避雷器

是两个间隙串联而成，一个装在气管内，称为内间隙，一个装在气管外，称为外间隙。外间隙的作用是使气管在正常运行时与工频电压隔离。当雷电冲击波袭来时，两个间隙均被击穿使雷电流入地，冲击电流消失后，间隙流过工频续流。在工频续流电阻的高温作用下，气管内分解出大量气体，形成很高的大气压力，高压气体从环形电极孔口急速喷出，强烈纵向冲动电弧，使工频续流在第一次过零时熄灭。图5示出排气式避雷器原理图。

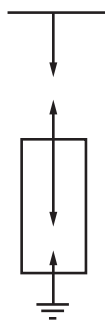


图5 排气式避雷器原理图

排气式避雷器缺点：

(1) 伏秒特性较陡且放电分散性较大，而一般变压器或其他电气设备绝缘的冲击放电伏秒特性较平坦，二者不能很好的配合；

(2) 管型避雷器动作以后，工作母线直接接地形成电压截波，对变压器绝缘有害；

(3) 放电特性受大气条件影响较大，气管容易破裂或爆炸且容易受潮。

图6示出排气式避雷器动作后的过电压波形图。

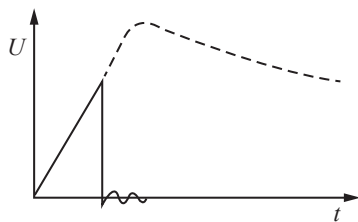


图6 排气式避雷器动作后的过电压波形

3.3.3 阀型避雷器

阀型避雷器由火花间隙和非线性电阻片两个部件串联而成，火花间隙和阀片电阻组装在瓷套中，做成避雷器的标准单元，然后组合成各种电压等级的避雷器，以供使用。火花间隙被分成许多短间隙，易于切断工频续流。用非线性电阻片以降低避雷器的残压，限制工频续流。非线性电阻片主要分成为SiC，冶炼时加Al₂O₃。图7示出阀型避雷器原理图。

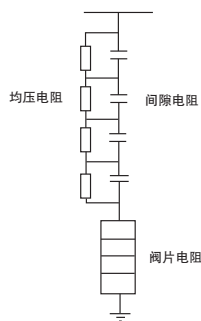


图7 阀型避雷器原理图

在220kV及以下系统，主要用于限制大气过电压。在超高压系统中还用来限制内部过电压。

阀型避雷器的缺点：

(1) 容易破损、故障时对周围的人身和设备安全隐患大；

(2) 笨重、接地焊点易脱落、密封性能不好，耐污秽性差、需每年维护一次。

图8示出阀型避雷器动作后的过电压波形。

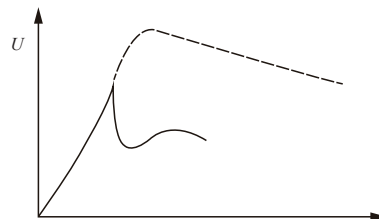


图8 阀式避雷器动作后的过电压波形

3.3.4 氧化锌避雷器 (MOA)

3.3.4.1 氧化锌避雷器

氧化锌避雷器采用具有极优异伏安特性的ZnO阀片做为保护单元。在正常系统电压作用下，氧化锌避雷器阀片呈高阻状态，流过避雷器的电流低于10μA，可视为无续流。当有过电压作用时，阀片立刻呈现低阻状态，将能量迅速释放，此后即恢复高阻状态，迅速截断工频续流。图9示出氧化锌电阻片的伏安特性。

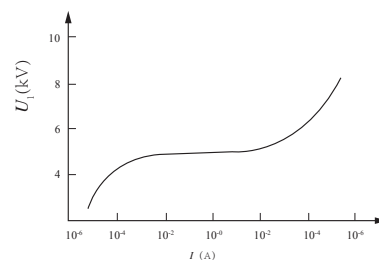


图9 氧化锌电阻片的伏安特性

氧化锌避雷器的阀片材料以氧化锌(ZnO)为主，适当添加氧化铋(Bi₂O₃)、氧化钴(CO₂O₃)、二氧化锰(MnO₂)、氧化锑(Sb₂O₃)等金属氧化物。加工成颗粒状混合搅拌均匀，然后烘干，压制成工作圆盘。经过高温烧结制作而成，阀片表面喷涂一层金属粉末(铝粉)，其侧面应涂绝缘层(釉，由瓷釉向玻璃釉发展)。

由于氧化锌阀片具有优异的非线性特性，所以不用串联间隙。图10示出氧化锌避雷器原理图。

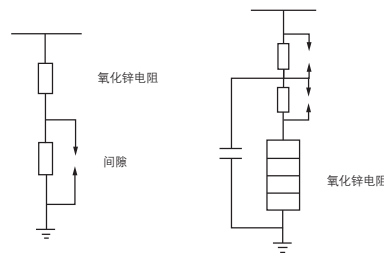
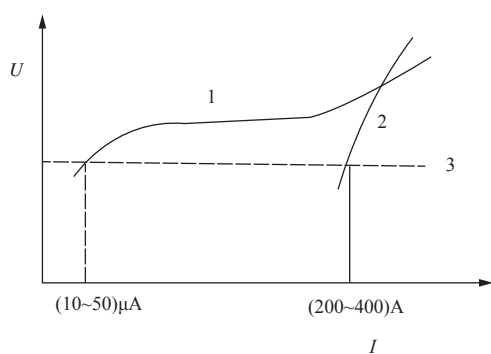


图10 氧化锌避雷器原理图

图 11 示出 ZnO 电阻片和 SiC 两种电阻片伏安特性比较。



1--ZnO 电阻片；2--SiC 电阻片；3-- 系统相电压

图 11 两种电阻片伏安特性比较

3.3.4.2 MOA 的优点

(1) 保持特性优异，没有放电时延，伏秒特性比较平坦，残压水平较低。

(2) 无续流，动作负载轻，在大电流长时间重复动作的冲击作用下，特性稳定。

(3) 运行性能良好，耐冲击能力强；通流大，耐污秽性能较好。

(4) 实用性好：结构简单、高度低、安装维护方便。

(5) 不存在间隙放电电压随避雷器内部气压变化而变化的问题，因此，无间隙避雷器是理想的高原地区避雷器。

(6) 特别适合用于直流输电设备的保护。直流电弧不像交流电弧有自然过零点，因此熄弧比较困难。无间隙避雷器不存在灭弧问题，所以用作直流避雷器是很理想的。

(7) 作为 SF₆ 全封闭组合电器中的一个组件是特别适合的，可解决传统避雷器的间隙在 SF₆ 中放电分散性大和放电电压易随气压变化而变化等问题。

(8) 用于重污秽地区比传统避雷器优越，不存在污秽影响间隙电压分布问题。

(9) 陡波下保护特性改善。不存在间隙放电电压随雷电波陡度的增加而增大的问题，陡波下保护特性有可能得到改善。

图 12 示出氧化锌避雷器动作后的过电压波形。

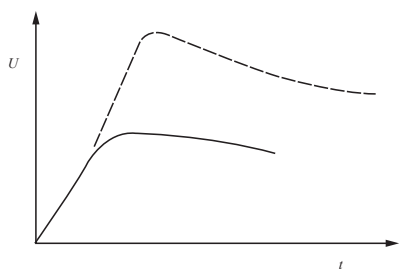


图 12 氧化锌避雷器动作后的过电压波形

3.3.4.3 MOA 的不足之处

(1) 由于没有放电间隙，阀片将因长期直接承受工频电

压的作用而产生劣化现象。其劣化的本质，从微观机理上看是晶界层的肖特基势垒的降低，引起阀片电阻值降低。泄漏电流增加，阻性分量电流是有功分量，它急剧增加势必加速阀片老化速度，可能在遇到操作冲击波作用其能量被吸附时，因阀片的损耗功率超过其散热功率，阀片温度上升而发生热崩溃，造成避雷器击穿损坏。受潮老化是引起 MOA 故障的两个根本原因。

(2) 在中性点非直接接地的 10kV~35kV 电力系统中，当发生单相接地故障时，一般允许带单相接地故障运行 2 小时甚至更长，而线路断路器不跳闸，这样其他两相的电压升高到线电压，这对无间隙 MOA 来说是严峻的考验。如果此时发生弧光接地或操作过电压，MOA 动作放电时就有击穿损坏的可能。

3.3.4.4 MOA 劣化的主要原因

(1) 内部密封不良引起内部受潮占相当比例，泄漏成倍增长，绝缘显着下降，有时形成局部导电通道，致使发生内部湿闪络。

(2) 某些 MOA 本身设计的荷电率太高，负荷过重。另外，因为电位分布不均，导致局部电阻片老化加速。由于电阻片在工作电压下呈现负的温度系数，使这种状况更为严重。它的高次谐波阻性电流也同步迅速增大。

3.3.4.5 复合外套氧化锌避雷器

为了克服瓷外套氧化锌避雷器内部容易受潮及易爆等缺陷，出现了新型的复合外套氧化锌避雷器。除了具有比瓷套避雷器更优越的保护性能外，还具有其独特优点：

- (1) 良好的密闭防潮性能，可以杜绝进潮通道；
- (2) 防爆性好，安全隐患小；
- (3) 重量轻，体积小，方便运输和安装；
- (4) 扩大了避雷器的使用范围；
- (5) 耐污秽性能好；
- (6) 散热特性好；
- (7) 制造工艺简单。

3.4 氧化锌避雷器的主要电气特性

(1) 避雷器额定电压 U_r

电压 U_r 是施加到避雷器端子间的最大允许工频电压有效值。按照此电压所设计的避雷器，能在所规定的动作负载实验中确定的暂时过电压下正常的工作。它是表明避雷器运行特性的一个重要参数，但不等于系统标称电压。

(2) 避雷器持续运行电压 U_c

电压 U_c 是允许持久地施加在避雷器两端的工频电压有效值。避雷器吸收过电压能量后温度升高，在此电压作用下能正常冷却，不发生热击穿。

(3) 参考电压（起始动作电压） U_{1mA}

通常以通过 1mA 工频电流阻性分量峰值和直流幅值时避

雷器两端电压峰值 U_{1mA} ，定义为参考电压。从这一电压开始，认为避雷器进入限制过电压的工作范围，所以也称为转折电压。

(4) 压比 K

压比 K 系指避雷器通过波形为 $8/20\mu s$ 的标称冲击放电电流时的残压与起始动作电压之比，例如 $5kA$ 压比为 $K=U_{5kA}/U_{1mA}$ ，压比越小，表明残压越低，保护性能越好。

(5) 荷电率

荷电率表明单位电阻片上的电压负荷， $\eta=U_c/U_{1mA}$ 。荷电率的高低对避雷器老化程度的影响很大，在中性点非有效接地系统中，一般采用较低的荷电率，而在中性点直接接地系统中，采用较高的荷电率。

(6) 冲击残压

这是避雷器保护特性中的主要指标，对于 $220kV$ 及以下的避雷器，一般都是按波形为 $8/20\mu s$ ，幅值为 $5kA$ 的冲击电流来测量残压的，对于 $330kV$ 及以上系统，由于可能出现较大的雷电流，因此使用幅度为 $10kA$ 的冲击电流来测量残压。残压越低，被保护设备的绝缘水平可以越低。

(7) 通流容量

通流容量表示避雷器阀片能耐受通过电流的能力。因为避雷器中通过的电流主要有两种，一种是雷电流，另一种是工频续流。所以通常分别用一定幅值的冲击电流和方波电流来进行试验，电流波形规定为 $4/10\mu s$ 。

方波电流试验，虽然电流幅值较小，但持续时间长得多（ $2000\mu s$ ），对阀片的考验是很严格的。

(8) 泄漏电流

氧化锌阀片相当于一个电阻和电容的混联电路，考虑杂散电容后，一支避雷器相当于一个阻容链。在交流电压下，避雷器的总泄漏电流中包含着阻性电流（有功分量）和容性电流（无功分量）。正常情况下，流过避雷器的主要为容性电流，阻性电流只占很小一部分。当阀片老化时，以及避雷器受潮，内部绝缘部件受损以及表面严重污秽时，容性电流不大，而阻性电流大大增加。所以测量泄漏电流是监测避雷器的主要方法，通常测量 $0.75U_{1mA}$ 下的泄漏电流值。

4 浪涌保护器

4.1 浪涌保护器工作原理

电路在遭雷击和接通、断开电感负载或大型负载时，常常会产生很高的操作过电压，当电压增加仅持续 $1ns$ 或 $2ns$ 时，被称为尖峰，当电压增加持续 $3ns$ 或更长时间时，被称为浪涌。这种瞬时过电压（或过电流）称为浪涌电压（或浪涌电流），是一种瞬变干扰。在多数情况下，浪涌电压会损坏电路及其部件，其损坏程度与元器件的耐压强度密切相关，并且与电路中可以转换的能量相关。

浪涌保护器（Surge Protection Device）是电子设备雷电保护中不可缺少的一种装置，过去常称为“避雷器”或“过电压保护器”，英文简称为 SPD。

浪涌保护器也叫防雷器，是一种为各种电力设备、仪器仪表、通信线路等提供安全保护的装置。当电气回路或者通信线路中因为外界的干扰突然产生尖峰电流或者电压时，浪涌保护器能在极短的时间内导通分流，从而避免浪涌对回路中其它设备的损害^[3-7]。

4.2 浪涌保护器分类

浪涌保护器的类型和结构按不同的用途有所不同，但至少应包含一个非线性电压限制元件。用于浪涌保护器的基本元件有：放电间隙、气体放电管，压敏电阻、抑制二极管和扼流线圈等。

4.2.1 按工作原理分

(1) 开关型

其工作原理是当设有瞬时过电压时呈现为高阻抗，但一旦响应雷电瞬时过电压时，其阻抗就突变为低值，允许雷电流通过。用作此类装置时的器件有：放电间隙，气体放电管，闸流晶体管等。

(2) 限压型

其工作原理是当设有瞬时过电压时为高阻抗，但随浪涌电流和电压的增加其阻抗会不断减小，其电流电压特性为强烈非线性。用作此类装置的器件有：氧化锌压敏电阻，抑制二极管、雪崩二极管。

(3) 分流型或扼流型

① 分流型

与被保护的设备并联，对雷电脉冲呈现低阻抗，而对正常工作频率呈现为高阻抗。

② 扼流型

与被保护的设备串联，对雷电脉冲呈现为高阻抗，而对正常的工作频率呈现为低阻抗。

用作此类装置的器件有：扼流线圈、高通滤波器、低通滤波器、 $1/4$ 波长短路器等。

4.2.2 按用途分

4.2.2.1 电源保护器

电源保护器分为：交流电源保护器、直流电源保护器、开关电源保护器等。

(1) 交流电源保护器

① 交流电源防雷模块适用于配电室，配电柜、开关柜、交直流配电屏等系统的电源保护；② 建筑物内有室外输入的配电箱，建筑物层配电箱；③ 用于低压（ $220/380V_{AC}$ ）工业电网和民用电网；④ 在电力系统中，主要用于自动化机房，变电站主控制电源屏内三相电源输入或输出端。

(2) 直流电源保护器

适用于各种直流电源系统，如：① 直流配电屏；② 直流供电设备，直流配电箱；③ 电子信息系统柜；④ 二次电源设备的输出端。

4.2.2.2 信号保护器

信号保护器分为：低频信号保护器，高频信号保护器、天馈保护器等。

(1) 网络信号防雷器

网络信号防雷器适用范围：① 用于 10/100Mbps SWITCH、HUB、ROUTER 等网络设备的雷击和雷电电磁脉冲造成的感应过电压保护；② 网络机房交换机防护；③ 网络机房服务器防护；④ 网络机房其它带网络接口设备防护。24 口集成防雷箱主要应用于综合网络柜，分交换机柜内多信号通道的集中防护。

(2) 视频信号防雷器

视频信号防雷器适用范围：主要用于视频信号设备点对点的协击保护，可保护各种视频传输设备免受来自信号传输线的感应雷击和浪涌电压带来的危害，对相同工作电压下的 RF 传输同样适用。集成式多口视频防雷箱，主要应用于综合控制柜内硬盘录像机、视频切割器等控制设备的集中防护。

(3) 信号防雷器安装、接线

- ① 防雷器串联在被保护设备与信号通道之间。
- ② 防雷器的输入端 (IN) 与信号通道相连，输出端 (OUT) 与被保护设备相连、并紧靠被保护设备安装，不能接反。
- ③ 把防雷器的接地线与防雷系统接地排可靠连接，接线越短越好，最长不能超过 1m。

4.3 浪涌保护器的基本元件

4.3.1 放电间隙 (又称保护间隙)

放电间隙一般由暴露在空气中的两根相隔一定间隙的金属棒组成，其中一根金属棒与所需保护设备的电源相线 L_1 或零线 N 相连，另一根金属棒与接地线 PE 相连接。当瞬时过电压袭来时，间隙被击穿，把一部分过电压的电荷引入大地，避免了被保护设备上的电压升高。这种放电间隙两金属棒之间的距离可按需要调整，结构较简单，其缺点是灭弧性能差。图 13 示出放电间隙原理图。

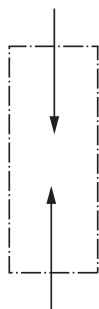


图 13 放电间隙原理图

改进型的放电间隙为角形间隙，灭弧功能较前者为好，它是靠回路的电动力 F 作用以及热气流上升作用而使电弧熄灭的。

4.3.2 气体放电管

气体放电管是由相互离开的一对冷阴极，封装在充有一定的惰性气体 (Ar) 的玻璃管或陶瓷管内组成的。为了提高放电管的触发概率，在放电管内还有助触发剂。这种充气放电管有二级型，也有三级型。图 14 示出气体放电管原理图。

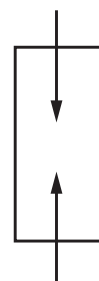


图 14 气体放电管原理图

气体放电管的技术参数主要有：直流放电电压 U_{dc} ；冲击放电电压 U_p (一般情况下 $U_p \approx (2\sim 3)U_{dc}$ ；工频耐受电流 I_n ；冲击耐受电流 I_p ；绝缘电阻 $R (>10^9 \Omega)$ ；极间电容 (1~5) pF)。

气体放电管可在直流和交流条件下使用，其所选用的直流放电电压 U_{dc} 分别如下：

在直流条件下使用： $U_{dc} \geq 1.8U_0$ (U_0 为线路正常工作的直流电压)；

在交流条件下使用： $U_{dc} \geq 1.44U_n$ (U_n 为线路正常工作的交流电压有效值)。

4.3.3 压敏电阻

压敏电阻是以 ZnO 为主要成分的金属氧化物半导体非线性电阻，当作用在其两端的电压达到一定数值后，电阻对电压十分敏感。它的工作原理相当于多个半导体 P-N 结的串并联。压敏电阻的特点是非线性好 ($I=CU^\alpha$ 中的非线性系数 α)，通流容量大 ($\sim 2kA/cm^2$)，常态泄漏电流小 ($10^{-7} A \sim 10^{-6} A$)，残压低 (取决于压敏电阻的工作电压和通流容量)，对瞬时过电压响应时间快 ($10^{-8} s$)，无续流。图 15 示出压敏电阻原理图。

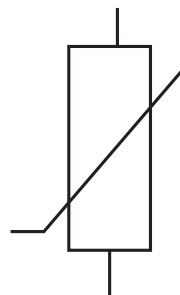


图 15 压敏电阻原理图

压敏电阻的技术参数主要有：压敏电压（即开关电压） U_N ；参考电压 U_{1mA} ；残压 U_{res} ；残压比（ $K=U_{res}/U_N$ ）；最大通流容量 I_{max} ；泄漏电流；响应时间。

压敏电阻的使用条件有：压敏电压 $U_N \geq [(2 \times 1.2) / 0.7] U_0$ （ U_0 为工频电源额定电压）。

最小参考电压： $U_{1mA} \geq (1.8 \sim 2) U_{dc}$ （直流条件下使用）；

$U_{1mA} > (2.2 \sim 2.5) U_{ac}$ （在交流条件下使用， U_{ac} 为交流工作电压）。

压敏电阻的最大参考电压应由被保护电子设备的耐受电压来确定，应使压敏电阻的残压低于被保护电子设备的耐受电压水平，即 $(U_{1mA})_{max} \leq U_b / K$ ，上式中的 K 为残压比， U_b 为被保护设备的耐受电压。

4.3.4 抑制二极管

抑制二极管具有箝位限压功能，它工作在反向击穿区，由于它具有箝位电压低和动作响应快的优点，特别适合用作多级保护电路中的最末几级保护元件。抑制二极管在击穿区内的伏安特性可用下式表示： $I=C U^\alpha$ ，上式中 α 为非线性系数，对于齐纳二极管 $\alpha=7 \sim 9$ ，在雪崩二极管 $\alpha=5 \sim 7$ 。图 16 示出抑制二极管原理图。



图 16 抑制二极管原理图

抑制二极管的技术参数主要有以下内容。

(1) 额定击穿电压

是指在指定反向击穿电流（常为 1mA）下的击穿电压，对于齐纳二极管额定击穿电压一般在 2.9V~4.7V 范围内，而雪崩二极管的额定击穿电压常在 5.6V~220V 范围内。

(2) 最大箝位电压

指管子在经过规定波形的大电流时，其两端出现的最高电压。

(3) 脉冲功率

脉冲功率指在规定的电流波形（如 10/1000 μ s）下，管子两端的最大箝位电压与管子中电流等值之积。

(4) 反向变位电压

反向变位电压是指管子在反向泄漏区，其两端所能施加的最大电压，在此电压下管子不应击穿。此反向变位电压应

明显高于被保护电子系统的最高运行电压峰值，也即不能在系统正常运行时处于弱导通状态。

(5) 最大泄漏电流

最大泄漏电流是指在反向变位电压作用下，管子中流过的最大反向电流。

(6) 响应时间

响应时间为 10^{-11} s。

4.3.5 扼流线圈

扼流线圈是一个以铁氧体为磁芯的共模干扰抑制器件，它由两个尺寸相同、匝数相同的线圈对称地绕制在同一个铁氧体环形磁芯上，形成一个四端器件，要对于共模信号呈现出大电感具有抑制作用，而对于差模信号呈现出很小的漏电感几乎不起作用。扼流线圈使用在平衡线路中，能有效地抑制共模干扰信号（如雷电干扰），而对线路正常传输的差模信号无影响。图 17 示出扼流圈原理图。

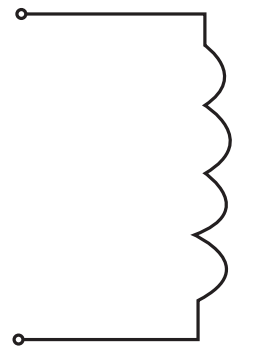


图 17 扼流圈原理图

这种扼流线圈在制作时应满足以下要求：

(1) 绕制在线圈磁芯上的导线要相互绝缘，以保证在瞬时过电压作用下线圈的匝间不能发生击穿短路；

(2) 当线圈流过瞬时大电流时，磁芯不要出现饱和；

(3) 线圈中的磁芯应与线圈绝缘，以防止在瞬时过电压作用下两者之间发生击穿；

(4) 线圈应尽可能绕制单层，这样做可减小线圈的寄生电容，增强线圈对瞬时过电压的耐受能力。

4.3.6 1/4 波长短路器

1/4 波长短路器是根据雷电波的频谱分析和天馈线的驻波理论所制作的微波信号浪涌保护器，这种保护器的金属短路棒长度是根据工作信号频率（如 900MHz 或 1800MHz）的 1/4 波长的大小来确定的。此并联的短路棒长度对于该工作信号频率来说，其阻抗无穷大，相当于开路，不影响信号传输，但对于雷电波来说，由于雷电能量主要分布在几 kHz 到几百 kHz 以下，此短路棒对于雷电波阻抗很小，相当于短路，雷电能量被泄放入地。图 18 示出 1/4 波长型电涌保护器工作原理图，图 19 示出 1/4 波长天馈线防雷原理图

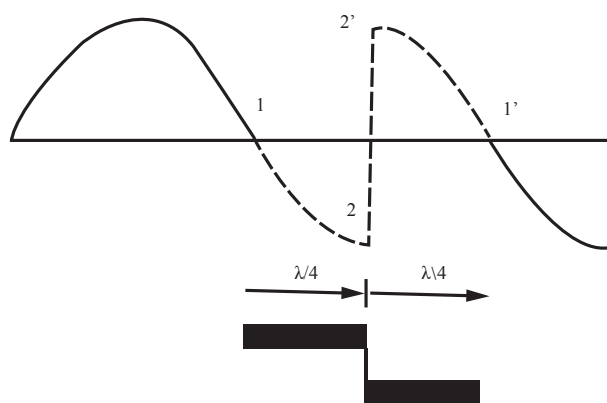


图 18 1/4 波长型电涌保护器工作原理图

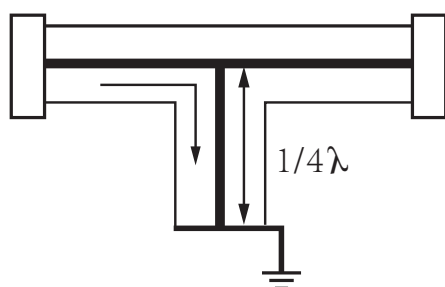


图 19 1/4 波长天馈防雷原理图

由于 1/4 波长短路棒的直径一般为几 mm，因此耐冲击电流性能好，可达到 300kA (8/20 μs) 以上，而且残压很小。此残压主要是由短路棒的自身电感所引起，其不足之处是工频带较窄，带宽约为 2%~20% 左右；另一个缺点是不能对天馈设施加直流偏置，使某些应用受到限制。

4.4 浪涌保护器的分级保护

由于雷电的能量非常巨大，需要通过分级泄放的方法，将雷击能量逐步泄放到大地。第一级防雷器可以对于直接雷击电流进行泄放，或者当电源传输线路遭受直接雷击时传导的巨大能量进行泄放，对于有可能发生直接雷击的地方，必须进行 I 级的防雷。

第二级防雷器是针对前级防雷器的残余电压以及区内感应雷击的防护设备，对于前级发生较大雷击能量吸收时，仍有一部分对设备或第三级防雷器而言是相当巨大的能量会传导过来，需要第二级防雷器进一步吸收。同时，经过第一级防雷器的传输线路也会感应雷击电磁脉冲辐射 (LEMP)，当线路足够长感应雷的能量就变得足够大，需要第二级防雷器进一步对雷击能量实施泄放。

第三级防雷器是对 LEMP 和通过第二级防雷器的残余雷击能量进行保护。

4.4.1 第一级保护

目的是防止浪涌电压直接从直击雷非防护区 (LPZOA) 或在直击防护区 (LPZOB) 传导进入第一防护区 (LPZ1)，

将数万 V 至数十万 V 的浪涌电压限制到 2500V~3000V。

入户电力变压器低压侧安装的电源防雷器作为第一级保护时，应为三相电压开关型电源防雷器，其雷电通流量不应低于 60kA。该级电源防雷器应是连接在用户供电系统入口进线各相和大地之间的大容量电源防雷器。

一般要求该级电源防雷器具备每相 100kA 以上的最大冲击容量，要求限制电压小于 1500V，称之为 I 级电源防雷器。这些电源防雷器是专为承受雷电和感应雷击的大电流以及吸引高能量浪涌而设计的，可将大量的浪涌电流分流到大地。它们不仅提供限制电压 (冲击电流流过电源防雷器时，线路上出现的最大电压称为限制电压) 为中等级别的保护，因为 I 级保护器主要是对大浪涌电流进行吸收，仅靠他们是不能完全保护供电系统内部的敏感用电设备的。

第一级电源防雷器可防范 10/350 μs、100kA 的雷电波，达到 IEC 规定的最高防护标准。其技术参数为：雷电通流量大于或等于 100kA (10/350 μs)；残压值不大于 2.5kV；响应时间小于或等于 100ns。

4.4.2 第二级防护

目的是进一步将通过第一级防雷器的残余浪涌电压的值限制到 1500V~2000V，对 LPZ1—LPZ2 实施等电位连接。

分配电柜线路输出的电源防雷器作为第二级保护时应为限压型电源防雷器，其雷电流容量不应低于 20kA，应安装在向重要或敏感用电设备供电的分路配电处。这些电源防雷器对于通过了用户供电入口处浪涌放电器的剩余浪涌能量进行更完善的吸收，对于瞬态过电压具有极好的抑制作用。该处使用的电源防雷器要求的最大冲击容量为每相 45kA 以上，要求限制电压应小于 1200V 称之为 II 级电源防雷器。一般用户供电系统做到第二级保护就可以达到用电设备运行的要求了。

第二级电源防雷器采用 C 类保护器进行相—中、相—地以及中—地的全模式保护，主要技术参数为：雷电通流容量大于或等于 40kA (8/20 μs)；残压值不大于 1000V；响应时间不大于 25ns。

4.4.3 第三级保护

目的是最终保护设备的手段，将残余浪涌电压的值降低到 1000V 以内，使浪涌的能量不致损坏设备。

在电子信息设备交流电源进线端安装的电源防雷器作为第三级保护时，应为串联式限压型电源防雷器，其雷电通流容量不应低于 10kA。

最后的防线可在用电设备内部电源部分采用一个内置式的电源防雷器，以达到完全消除微小的瞬时过电压的目的。该处使用的电源防雷器要求的最大冲击容量为每相 20kA 或更低一些，要求的限制电压应小于 1000V。对于一些特别重要或特别敏感的电子设备具备第三级保护是必要的，同时也可以

保护用电设备免受系统内部产生的瞬态过电压影响。

对于微波通信设备、移动基站通信设备及雷达设备等使用的整流电等，宜视其工作电压的保护需要分别选用工作电压适配的直流电源防雷器作为末级保护。

4.4.4 第四级及四级以上保护

根据被保护的耐压等级，假如两级防雷就可以做到限制电压低于设备的耐压水平，就只需要做两级保护，假如设备的耐压水平较低，可能需要四级甚至更多级的保护。第四级保护其雷电通流容量不应低于 5kA。

4.5 浪涌保护器的主要性能参数

4.5.1 SPD 冲击试验分类

(1) I 级分类试验 Class I tests

试验用的波形为 10/350 μ s。

对试品进行标称放电电流 I_n ，1.2/50 μ s 冲击电压和冲击电流 I_{imp} 的试验。10/350 μ s 波形是可能实现 I_{imp} 波形 3 个参数要求的波形之一。主要防直击雷，一般为电压开关型。

(2) II 级分类试验 Class II tests

试验用的波形为 8/20 μ s。

对试品进行标称放电电流 I_n ，1.2/50 μ s 冲击电压和最大放电电流 I_{max} 试验。 I_n 和 I_{max} 的波形为 8/20 μ s。主要防感应雷，一般为电压限制型。

(3) III 级分类试验 Class III tests

对试品进行组合波（1.2/50 μ s 电压波，8/20 μ s 电流波）试验。

主要防感应雷，一般为电压限制型或组合型。

4.5.2 SPD 的主要参数

(1) 最大持续运行电压 U_c

可以持续施加于浪涌保护器上而不导致 SPD 动作的最大交流有效值电压或最大直流电压，为 SPD 动作的阈值，等于浪涌保护器的额定电压。

(2) 标称放电电流 I_n

流过 SPD 的 8/20 μ s 电流波的峰值电流，用于对 SPD 做 II 级分类实验或做 I 级分类实验的预处理。对于 I 级分类实验 I_n 不小于 15kA，对于 II 级分类实验 I_n 不小于 5kA。

(3) 电压保护水平 U_p

在标称放电电流（ I_n ）下的残压，又称 SPD 的最大箝压，对于电源保护器而言，可分为一级、二级、三级、四级保护，保护级别决定其安装位置，在信息系统中保护级别需与被保护系统和设备的耐压能力相匹配。

(4) 暂时过电压耐受值 U_T

SPD 能耐受的，持续短时间的直流过电压或最大工频过电压（有效值）。在规定时间内， U_T 大于 U_c 。

(5) 暂时过电压 U_{TOV}

低压电气系统中给定区域持续时间较长的工频过电压。

U_{TOV} 可能由低压（LV）或高压（HV）系统内部故障造成。

U_{TOV} 典型的持续时间最长为 5s。

(6) 标称电压 U_0

低压配电系统或设备标称的电压，某些特性与该电压值（如 220V/380V）有关。在正常的标称系统中，供电终端的电压可能与供电系统标称的电压不同，一般允许有 $\pm 10\%$ 的公差。

系统中相线对中性线的电压用 U_0 表示；相线对地线的电压用 U_n 表示。

(7) 冲击电流 I_{imp}

用于电源的第一级保护 SPD，反映了 SPD 的耐直击雷能力（采用 10/350 μ s 波形）

由幅值电流 I_{peak} ，电荷量 Q 和比能量 W/R 三个参数来决定。用于低压电气系统的 SPD 的 I 级分类试验。冲击电流 I_{imp} 应在 50 μ s 内达到 I_{peak} ，应在 10ms 内输送电荷量 Q （As）和应在 10ms 内达到比能量 W/R 。

(8) 持续工作电流 I_c

在最大持续电压（ U_c ）下，流过 SPD 的电流，其中流经接地端子（如 PE）的电流为残流（ I_{res} ）

(9) 续流 I_f

冲击放电电流结束瞬间，流过 SPD 的由供电电源提供的电流。在低压交流配电系统中，一般将此电流称为工频续流。

(10) 额定负载电流 I_L

流经连接至低压配电系统的双端口 SPD 输出端提供给负载允许的最大持续交流电流（r.m.s）或直流电流。

(11) 开路电压 U_{oc}

组合波的开路，是 III 级试验 SPD 产品参数。

4.5.3 SPD 基本参数

表 1 列出 SPD 试验基本参数。

表 1 SPD 试验基本参数

I 级试验 SPD	II 级试验 SPD	III 级试验 SPD
冲击电流 I_{imp}	—	—
标称放电电流 I_n	标称放电电流 I_n	—
—	最大放电电流 I_{max}	—
额定断开续流值	—	—
—	—	开路电压 U_{oc}
电压保护水平 U_p	电压保护水平 U_p	电压保护水平 U_p
最大持续工作电压 U_c	最大持续工作电压 U_c	最大持续工作电压 U_c

5 避雷器和浪涌保护器的比较

5.1 安装避雷器后仍有设备被雷击损坏

避雷器指建筑物避雷器，与避雷针、接地排等一起形成一个法拉第笼，防止建筑物被损坏，避雷器的基本原理是把

雷击电磁脉冲 (LEMP) 导入地进行消解。但是在安装避雷器后仍有大量的建筑物及其里面的设备被雷击损坏^[3,4]。

(1) 避雷器的导线采用铜铁合金, 因此其导线性能是有限的, 反应速度仅为 $200\mu\text{s}$ 。而 LEMP 的半峰速度 (能量达到最大值) 为 $20\mu\text{s}$, 也就是说 LEMP 的速度快于避雷器, 这样避雷器把第一次直击雷导入地后, 对于二次雷、三次雷往往反应不过来, 直接泄漏打在设备上。也就是说, 避雷器对二次雷, 三次雷几乎不起作用。

(2) LEMP 导入地后, 会从地返回形成感应雷。感应雷会从所有含金属的导线上泄漏到设备 (网线, 电源线、信号线、传输线等)。由于避雷器是单向作用的, 因此它对感应雷不起作用, 感应雷可以直接打坏设备, 更何况, 导线部分往往不会安装避雷器。

(3) 浪涌只有 20% 来自雷击等外部环境, 80% 来自系统内部运行, 避雷器对这 80% 是不起任何作用的。

5.2 浪涌保护器和避雷器的区别

(1) 应用范围不同 (电压)

避雷器范围广泛, 有很多电压等级, 一般从 0.4kV 低压到 500kV 超高压都有, 而浪涌保护器一般指 1kV 以下使用的过电压保护器。

(2) 保护对象不同

避雷器是保护电气设备的, 而浪涌保护器一般是保护二次信号回路或给电子仪器仪表等末端供电回路。

(3) 绝缘水平或耐压水平不同

电器设备和电子设备的耐压水平不在一个数量级上, 过电压保护装置的残压应与保护对象的耐压水平匹配。

(4) 安装位置不同

避雷器一般安装在一次系统上, 防止雷电波的直接侵入, 保护架空线及电气设备; 而浪涌保护器多安装于二次系统上, 是在避雷器消除了雷电波的直接侵入后, 或避雷器没有将雷电波消除干净时的补充措施; 所以避雷器多安装在进线处, 浪涌保护器多安装于末端出线或信号回路处。

(5) 通流容量不同

避雷器因为主要作用是防止雷电过电压, 所以其相对通流容量较大; 而对于电子设备, 其绝缘水平远小于一般意义上的电气设备, 故需要浪涌保护器对雷电过电压和操作过电压进行保护, 但其通流容量一般不大 (浪涌保护器一般在末端, 不会直接与架空线路连接, 经过一级的限流作用, 雷电流已经被限制到较低值, 这样通流容量不大的浪涌保护器完全可以起到保护作用, 通流值不重要, 重要的是残压)。

(6) 其它绝缘水平, 对参数的着眼点等也有较大差异。

(7) 供电系统电压等级不同

浪涌保护适用于低压供电系统的精细保护, 依据不同的

交直流电源可选择各种相应的规格。

电源浪涌保护器一精细, 由于终端设备离前级浪涌保护器距离较大, 从而使得该线路上容易产生振荡过电压或感应到其他过电压。适用于终端设备的精细电源浪涌保护, 与前级浪涌保护器配合使用, 则保护效果更好。

(8) 选用材质差异

避雷器主材质多为氧化锌 (金属氧化物变阻器的一种), 而浪涌保护器主材质根据浪涌等级, 分级防护 (IEC61312) 的不同是不一样的, 而且在设计上比普通防雷器精密得多。

(9) 技术水平差异

避雷器在响应时间、限压效果、综合防护效果、抗老化特性等方面都达不到浪涌保护器的水平。

避雷器与浪涌保护器共同点: 都能防止雷电过电压。因为上述原因, 浪涌保护器也就应运而生。

浪涌保护器的原理是把 LEMP 转化为热能进行消解, 由于不是导通式, 反应速度非常快, 可低于 ns , 可以有效防止二次雷和三次雷。浪涌保护器分为电源 SPD, 精密仪器 SPD, 数字线路 SPD, 而且也是双向作用的, 可以有效防止感应雷。因此, IEEE 标准规定, 在安装避雷器的同时应该加上浪涌保护器, 以形成防雷的双保险。

此外, 浪涌保护器对于内部的 80% 的浪涌也能起到有效抑制作用, 这是避雷器所不能做到的。

6 结束语

总体来讲, 避雷器是专门针对电气设备免受雷电冲击波所设置的防护设备, 而浪涌保护器是比避雷器更先进的防护设备, 除开雷电冲击波, 还可以极大程度削弱电力系统自身所产生的其他破坏性浪涌冲击。在用电单位高压进线系统 (10kV 及以上) 已装设避雷器的情况下, 在低压系统中就应该装设防护功能更精密的浪涌保护器。

参考文献

- [1] <http://wenku.baidu.com/view/6540586427d3240e8447ef32.html>
- [2] <http://wenku.baidu.com/view/214de3d4360cba/aa8//da3b.html>
- [3] 中国防雷信息网. 电涌保护器 (SPD) 工作原理和结构. 2012 年 5 月 14 日 <http://wenku.baidu.com/view/0072fb6227d3240c8447ef0b.html>
- [4] <http://wenku.baidu.com/view/60e2b10103d8ce2f0066236a.html>
- [5] 施广全. 电涌保护器 SPD 在低压电气系统中的选择和使用原则. <http://wenku.baidu.com/ce6ea56527d3240c8447ef19.html>
- [6] 中国防雷商务网. 低压配电系统中电涌保护器的选择及安装. <http://wenku.baidu.com/cdae97204b35eefdc8d33381.html>

(下转第 23 页)