

文章编号: 1003-8337 (2004) 06-0026-03

# 电涌保护器中压敏电阻并联的方法 and 理论分析

王茂华<sup>1</sup>, 胡克鳌<sup>1</sup>, 张南法<sup>2</sup>(1. 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030;  
2. 常州市创捷防雷电子有限公司, 江苏 常州 213016)

**摘 要:** 为了提高电涌保护器中压敏电阻的耐电流冲击性能, 可采用压敏电阻的并联组合。通过对并联组合后的压敏电阻电性能的分析, 认为电流偏差是由于限制电压不相等 ( $U_{a1}$   $U_{a2}$ ) 和动态电阻不相等 ( $R_{z1}$   $R_{z2}$ ) 两个因素造成的, 且动态电阻越大, 电流偏差越小。压敏电阻并联时, 可取限制电压  $U_a$  相等, 而动态电阻  $R_z$  相差不超过规定值; 也可取动态电阻  $R_z$  相等, 限制电压  $U_a$  相差不超过规定值, 使电流偏差在 10% 范围内。

**关键词:** 电涌保护器; 压敏电阻; 并联

中图分类号: TN 304 文献标识码: A

## The Method and Theoretical Analysis of Parallel Connection of Varistors in Surge Protective Devices

WANG Mao-hua<sup>1</sup>, HU Ke-ao<sup>1</sup>, ZHANG Nan-fa<sup>2</sup>(1. State Key Lab of MMCS, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;  
2. Changzhou Chuangjie Lightning Protection Co. Ltd, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** The lightning discharge current withstand capability of varistors in surge protective devices is improved by parallel connection. The current deviation is due to the difference in clamping voltage ( $U_{a1}$   $U_{a2}$ ) and dynamic resistance ( $R_{z1}$   $R_{z2}$ ) according to the theoretical analysis of electrical characteristics of parallel varistors, the higher the dynamic resistance, the lower the current deviation. When the parallel connection of varistors is carried out, the clamping voltage ( $U_a$ ) shall be set equal, and the difference of dynamic resistance ( $R_z$ ) being within the specified tolerance, or the dynamic resistance set equal, and the difference of clamping voltage being within the specified tolerance, which makes the current deviation in the range of 10%.

**Key words:** surge protective devices; varistor; parallel connection

### 1 前言

ZnO 压敏电阻具有造价低廉, 非欧姆特性优良, 响应时间快, 漏电流小, 通流容量大等优点, 因此被广泛应用于电子线路、电力系统以及其它领域。

电涌保护器 (Surge Protective Devices, 简称 SPD) 是用于抑制瞬态过电压和分流冲击电流的器

件。它至少包含一个非线性元件<sup>[1]</sup>。SPD 主要由非线性元件、放电通道和性能劣化指示装置等组成, 用来保护用电系统。按其用途可分为电源保护器 (额定电压 100V ~ 1 000V)、信息系统保护器 (电压 100V 以下)、放电间隙 (用于接地系统和等电位连接)<sup>[2]</sup>。目前 SPD 的应用越来越普及, 限压型 SPD 基本都使用 ZnO 压敏电阻片 (简称 MOV) 作为非线性元件。

收稿日期: 2004-08-01; 修回日期: 2004-10-09

作者简介: 王茂华 (1967-), 男, 江西玉山人, 博士, 从事电子材料的研究开发和生产。

电源系统防雷和过电压保护用的 C 级和 B 级 SPD, 对于 8/20 冲击电流的通流指标要求, 大体在 (10kA ~ 150kA) 范围内, 要达到这样的要求, 采用的方法: 一是经常采用  $\phi_{4\text{mm}} \times 34\text{mm}$  的电阻片; 二是采用多个电阻片的并联组合。在 SPD 的生产和使用中, 多采用压敏电阻的并联组合。因为压敏电阻的面积与直径之比较大, 由于其制造工艺较复杂, 合格率低, 内部结构的均匀性差, 因而通流水平低。

笔者对 SPD 中压敏电阻的并联进行了理论分析, 并提出了并联方法。

## 2 压敏电阻并联的特点

对 SPD 中压敏电阻的并联, 应保证在 SPD 的整个工作寿命期内, 以及在规定的温度范围内, 流入 SPD 的冲击电流大约平均地分配到每一个并联支路中去, 其实质就是选择伏安特性相同的电阻片, 然后将它们并联起来, 这就是压敏电阻的均流性并联, 只有对压敏电阻片进行正确的均流性并联, 才能获得性能优良的 SPD。

对于压敏电阻的均流性并联是否良好, 为此定义一个“电流偏差”的概念  $J_L$  (%), 它是各支路电流的实际值, 相对于完全均流时电流值的百分偏差。

$$J_L = \frac{I_{\text{mm}} - I_p/n}{I_p/n} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $n$  为并联的支路数,  $I_p$  为流入 SPD 总体电流的峰值,  $I_{\text{mm}}$  是所有并联各支路中实际电流峰值。显然  $J_L = 0$  是理想并联的情况, 实际生产和应用中, 电流偏差  $J_L$  一般控制在 10% 的范围内。并联的压敏电阻片, 它们的特性不仅在常温和寿命初期时应是一致的, 能够满足电流偏差的要求, 而且在规定工作温度范围的极限温度条件下, 以及整个寿命期内, 也都应满足这个要求。这就是说, 温度特性和老化特性也应一致, 一般情况下, 同一批生产的电阻片, 通过可靠性筛选, 剔除早期可能失效的有缺陷产品后, 它们的温度特性和老化特性是比较一致的<sup>[3,4]</sup>, 经均流性并联组合后, 各支路的电流偏差能保证在允许的范围内。

进行均流性并联的电流范围为  $(0.01 \sim 1.0) I_{\text{max}}$  ( $I_{\text{max}}$  为最大放电电流)。对于绝大多数压敏电阻片, 当电流小到最大放电电流的 1% 时, 它的冲击寿命约为  $(10^4 \sim 10^5)$  次, 也就是说, 这么小的电流, 经反复冲击所引起的老化, 在 SPD 的一般工作寿命期

内可以暂不考虑。

## 3 压敏电阻均流并联的原理

### 3.1 并联电流区间内, 压敏电阻的限制电压特性

并联电流区间的下限为  $I_a$ , 上限为  $I_b$ , 在这个电流区间内, 压敏电阻的限制电压特性可表示为

$$U = U_a + R_z \Delta I \quad (2)$$

式中  $U$ 、 $I$  分别表示限制电压峰值及其所对应的 8/20 电流峰值,  $U_a$  是下限电流  $I_a$  时的限制电压, 电流增量  $\Delta I = (I - I_a)$ , 即  $I = I_a + \Delta I$ 。  $R_z$  是动态电阻, 表示压敏电阻的限制电压增量与对应的冲击电流增量之比, 但是在并联电流区间内, 动态电阻  $R_z$  不是个常量, 例如对于  $\phi_{4\text{mm}} \times 34\text{mm}$  的电阻片, 电压规格为 680V 时, 动态电阻的大约值见表 1。

表 1  $\phi_{4\text{mm}} \times 34\text{mm}$ 、电压规格为 680V 时电阻片的动态电阻

电流/kA	2~5	5~10	10~15	15~20	20~30
$R_z/\text{m}\Omega$	32	18	15	13	12

从表 1 可见, 动态电阻  $R_z$  随电流的增大而减小, 但当电流密度大于  $1.1\text{kA}/\text{cm}^2$  后基本上不变了。从现有的测试结果来看, 电流从 10kA 到 40kA ( $1.1\text{kA}/\text{cm}^2$  到  $4.5\text{kA}/\text{cm}^2$ ), 可认为动态电阻达到最小稳定值。

### 3.2 双片压敏电阻的均流性并联

设有 1、2 两只同规格的压敏电阻器相并联, 流入该并联组合的总电流为  $I_0$ , 在理想情况下, 两只样品中流过的电流都是  $I_0/2$ , 实际电流分别是  $I_1$ 、 $I_2$ , 它们相对于  $I_0/2$  的偏差, 分别是  $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$ , 显然,  $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$  的绝对值相等但符号相反。为便于分析, 下面假定  $\Delta I_1 = \Delta I$ ,  $\Delta I_2 = -\Delta I$ , 而两者的限制电压都是  $U$ , 于是有

$$U = U_{a1} + R_{z1}(0.5I_0 + \Delta I - I_a) \quad (3)$$

$$U = U_{a2} + R_{z2}(0.5I_0 + \Delta I - I_a) \quad (4)$$

令 (3)、(4) 两式相等, 可得

$$\Delta I = \frac{U_{a2} - U_{a1}}{R_{z1} + R_{z2}} + (0.5I_0 - I_a) \frac{R_{z2} - R_{z1}}{R_{z1} + R_{z2}} \quad (5)$$

(5) 式是双片均流性并联的基本依据, 它说明了电流偏差是由于压敏电阻下限限制电压不相等 ( $U_{a1}$ 、 $U_{a2}$ ) 和动态电阻不相等 ( $R_{z1}$ 、 $R_{z2}$ ) 两个因素造成的, 且动态电阻越大, 电流偏差越小。

从 (3)、(4) 两式还可以推导出一个重要的结果, 将 (3)、(4) 两式相加再除以 2, 便可得到

$$U = \frac{U_{a1} + U_{a2}}{2} + (0.5I_0 - I_a) \frac{R_{z1} + R_{z2}}{2} + \Delta I \frac{R_{z1} - R_{z2}}{2} \quad (6)$$

(6) 式右边的第三项  $\Delta I$  是个小值量, ( $R_{z1} - R_{z2}$ ) 也是一个小值量, 因此第三项相对于前两项可忽略不计, 于是 (6) 式可表示成

$$U = \frac{U_{a1} + U_{a2}}{2} + (0.5I_0 - I_a) \frac{R_{z1} + R_{z2}}{2} \quad (7)$$

(7) 式的物理意义是, 它表示冲击电流  $I_0$  流入两个特性相同的压敏电阻器并联组合时, 这两个相同压敏电阻的并联下限限制电压值等于两个实际并联压敏电阻的下限限制电压的均值, 而动态电阻值则等于两个实际并联压敏电阻的动态电阻均值。这两个特性相同的压敏电阻, 就是两个特性不同的实际压敏电阻的等效压敏电阻, 利用等效压敏电阻, 可以很容易确定当冲击电流  $I_0$  流入两个特性相同的压敏电阻并联组合时, 组合两端的限制电压。还可计算出参与并联的压敏电阻片中的电流:

$$I_1 = I_a + (U - U_{a1}) / R_{z1}$$

$$I_2 = I_a + (U - U_{a2}) / R_{z2}$$

利用 (4) 式, 可以确定一批产品并联的最高参数范围。如: 一批  $\phi 4\text{mm} \times 34\text{mm}$ 、电压规格为 620V 的电阻片, 用于双片并联组合, 要求流入 60kA 时, 均流偏差小于 10%, 即  $\Delta I = 30\text{kA} \times 0.1 = 3\text{kA}$ 。当  $\Delta I = 3\text{kA}$  时, 限制电压的中心值  $U_a = 1180\text{V}$ , 动态电阻中心值  $R_z = 24\text{m}\Omega$ , 计算该批产品并联的最高参数范围。

(1) 假定并联压敏电阻动态电阻与产品的动态电阻中心值  $R_z$  相同, 则利用 (5) 式可确定并联产品在  $I_a = 10\text{kA}$  时的  $U_a$  值的范围:  $\Delta U_a = 2\Delta I \cdot R_z = 2 \times 3 \times 24 = 144(\text{V})$ , 于是并联产品  $U_a$  的范围应从  $(1180 - 144) = 1036(\text{V})$  到  $(1180 + 144) = 1324(\text{V})$ 。

(2) 假定并联压敏电阻下限限制电压与产品的下限限制电压中心值  $U_a$  相同, 则利用 (5) 式可确定并联产品动态电阻  $R_z$  值的范围: 令  $\Delta I = 3\text{kA}$ , 通过计算得  $R_z = 32.5\text{m}\Omega$ ; 令  $\Delta I = -3\text{kA}$ , 通过计算得  $R_z = 17.7\text{m}\Omega$ 。

上述计算结果可表示成图 1。这个图表示了其 ( $U_a/R_z$ ) 参数在方框内的任何两个产品都可以并联, 它们并联起来后, 两者的电流偏差不会大于 10%。且因为方框中心点是该批产品参数的中位点, 因此并联率高。对于方框以外的 ( $U_a/R_z$ ) 参数邻近的产品, 也可按上述方法并联。

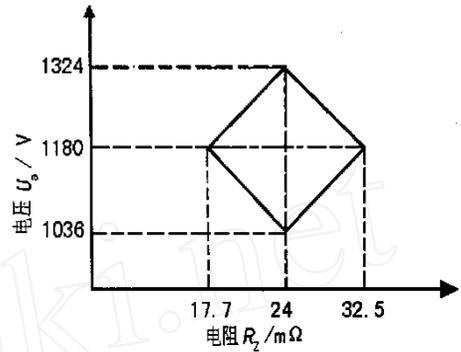


图 1 双片压敏电阻并联参数范围的方框图

### 3.3 n 个压敏电阻并联

为了简明易懂, 先看 3 个压敏电阻并联时的情况, 参照 (3), (4) 两式, 可以写出

$$U = U_{a1} + R_{z1}(I_0/3 + \Delta I_1 - I_a)$$

$$U = U_{a2} + R_{z2}(I_0/3 + \Delta I_2 - I_a)$$

$$U = U_{a3} + R_{z3}(I_0/3 + \Delta I_3 - I_a)$$

将上面三个式子左右两边相加后除以 3, 可得

$$U = (U_{a1} + U_{a2} + U_{a3})/3 + (I_0/3 - I_a)(R_{z1} + R_{z2} + R_{z3})/3 + (\Delta I_1 R_{z1} + \Delta I_2 R_{z2} + \Delta I_3 R_{z3})/3$$

上式的末项, 由于实际上  $R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}$  差别不大, 从工程的角度进行处理, 将它们看作相等, 并用  $R_z$  来表示, 末项的分子变成  $(\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3)R_z$ , 而  $(\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3)$  是恒等于零的, 于是, 三个压敏电阻并联的等效电阻为

$$U = (U_{a1} + U_{a2} + U_{a3})/3 + (I_0/3 - I_a)(R_{z1} + R_{z2} + R_{z3})/3 \quad (8)$$

$U$  是  $I_0$  流入这个并联组合时, 组合两端的电压。有了  $U$  值, 当  $I_0$  流入时, 各个参与并联的压敏电阻片中的电流就很容易确定:

$$I_1 = I_a + (U - U_{a1}) / R_{z1}$$

$$I_2 = I_a + (U - U_{a2}) / R_{z2}$$

$$I_3 = I_a + (U - U_{a3}) / R_{z3}$$

显然, 上面的结果可以推广到  $n$  个压敏电阻并联的情况, 组合后两端的电压为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n U_{ai}}{n} + \left( \frac{I_0}{n} - I_a \right) \frac{\sum_{i=1}^n R_{zi}}{n} \quad (9)$$

各支路的电流为

$$I_n = I_a + (U - U_{an}) / R_{zn}$$

## 4 压敏电阻均流并联的方法

电涌保护器中的压敏电阻片多为  $\phi 4\text{mm} \times 34\text{mm}$ ,

(下转第 33 页)

- ~ 646.
- [11] Einzinger R. Metal oxide varistors [J]. Am. Res. Mater. Sci., 1987 (17): 299~ 321.
- [12] 蔡灿强. 电子陶瓷细粉的化学合成技术 [J]. 电子元件与材料, 1987, 6 (3): 44~ 48.
- [13] Sonder E, Quinby T C, Kinser D L. ZnO varistors made from powders produced using a urea process [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1986, 65 (4): 665~ 668.
- [14] Hohenberger G, Tomandal G. Sol-Gel processing of varistor powders [J]. Journal of Materials Research, 1992, 7 (3): 546~ 548.
- [15] Lauf R J, Bond W D. Fabrication of high-field zinc oxide varistors by Sol-Gel processing [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1984, 63 (2): 278~ 281.
- [16] Hishita S, Yao Y, Shirasaki S. Zinc oxide varistors made from powders prepared by amine processing [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1989, 72 (2): 338~ 340.
- [17] Lee W E, Karakaas Y. Processing and phase evolution in ZnO varistor prepared by oxide coprecipitation [J]. British Ceramic Transactions, 1994, 93 (2): 65~ 70.
- [18] 袁方利, 季幼章. 化学合成法制备 ZnO 压敏电阻的研究 [J]. 电瓷避雷器, 1995 (1): 39~ 44.
- [19] 费自豪, 王志宏. 化学合成瓷料对 ZnO 压敏电阻的性能及微观结构影响 [J]. 材料科学和工艺, 1998 (6): 24~ 27.
- [20] 彭忠东, 李自强. 氧化锌压敏电阻的湿式化学合成法 [J]. 压电与声光, 1999 (2): 145~ 149.
- [21] Hingorani S, Pillai V, Kumar P, et al. Microemulsion mediated synthesis of zinc-oxide nanoparticles for varistor studies [J]. Materials Research Bulletin, 1993, 28 (12): 1303~ 1310.
- [22] Viswanath R N, Ramasamy S, Ramamoorthy R, et al. Preparation and characterization of nanocrystalline ZnO based materials for varistor applications [J]. Nanostructured Materials, 1995 (6): 993~ 996.
- [23] 翟维琴. 提高氧化锌电阻片通流能力 [J]. 上海电器技术, 2001 (4): 33~ 35.
- [24] 谭宜成, 刘子玉. ZnO 阀片的制作新法及性能分析 [J]. 电工技术学报, 1989 (1): 57~ 61.
- [25] 袁方利, 李晋林, 季幼章. ZnO 粉颗粒形状和大小对压敏陶瓷电阻的影响 [J]. 功能材料, 1997, 28 (1): 392~ 395.
- [26] 王振林, 葛平安. 添加物的细磨程度对氧化锌电阻片主要电气性能的影响 [J]. 电瓷避雷器, 1993 (3): 43~ 46.
- [27] 袁方利, 季幼章. 添加剂粉料的颗粒度对 ZnO 压敏电阻片通流能力的影响 [J]. 电瓷避雷器, 1996 (4): 40~ 42.

(上接第28页)

在 1kA ~ 20kA (标称放电电流) 范围内, 动态电阻  $R_z$  的变化很小, 可近视地将它视为一常数。此外在实际测量中, 为防止未封装银片的跳火, 测量电流不能取得很大, 例如取 1kA 和 2kA 两个点来确定动态电阻  $R_z = \Delta U / \Delta I$ , 2kA 电流下的电压作为下限限制电压  $U_a$ , 根据以上压敏电阻均流并联原理的理论分析, 把所有测得压敏电阻的动态电阻  $R_z$  和下限制电压  $U_a$  分别进行从小到大排序, 选取动态电阻  $R_z$  基本相等, 下限限制电压  $U_a$  相差不超过规定值的压敏电阻, 并联后能达到各支路均流的要求, 或者也可采用下限限制电压  $U_a$  基本相等, 动态电阻  $R_z$  相差不超过规定值的方法来进行压敏电阻的均流并联, 使并联后各支路的电流偏差不得超过 10%。

## 5 结论

(1) 压敏电阻并联的电流偏差是由于限制电压

不相等 ( $U_{a1}$   $U_{a2}$ ) 和动态电阻不相等 ( $R_{z1}$   $R_{z2}$ ) 两个因素造成的, 且动态电阻越大, 电流偏差越小。

(2) 压敏电阻均流并联时, 可取限制电压相等, 而动态电阻  $R_z$  相差不超过规定值; 也可取动态电阻  $R_z$  相等, 限制电压  $U_a$  相差不超过规定值, 可保证电流偏差在 10% 范围内。

## 参考文献

- [1] IEC61643-1, Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system Part I: Performance requirements and testing methods [S].
- [2] 王智明. 低压电源避雷器的应用技术 [J]. 低压电器, 2000 (6): 57~ 59.
- [3] 徐廷献. 电子陶瓷材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1993.
- [4] Prisching D, Pecina A H. Temperature behaviour of ZnO varistors before and after post sintering heat treatment [J]. Mater. Lett., 2000, 43 (5): 295~ 302.