

一种SPD专用高安全性压敏电阻陶瓷芯片

A SPD-specific high-safety varistor ceramic chip

张治成, 章俊, 石小龙

成都铁达电子股份有限公司 成都 610036

摘要:一种 SPD 专用高安全性压敏电阻陶瓷芯片, 该器件用多个元件串并联的方式, 采取独特的设计使特定元件在实际应用中率先达到寿命周期并失效, 并通过限制该元件失效后的短路电流和温升, 使 SPD 配置的过热 脱离器有充足的时间响应动作, 最终以开路模式安全地退出电网, 并发出失效报警信号。

关键词: SPD, 专用, 高安全性, 压敏电阻, 陶瓷芯片

1 前言

在认真研究了 SPD 中的压敏电阻陶瓷芯片的失效原因和失效模式后, 克服了目前其他失效保护技术的缺点和不足, 开发出一种高安全性 SPD 专用压敏电阻陶瓷芯片, 以 TMYL 命名。

该器件用多个元件串并联的方式, 采取独特的设计使特定元件在实际应用中率先达到寿命周期并失效, 并通过限制该元件失效后的短路电流和温升, 使 SPD 配置的过热脱离器有充足的时间响应动作, 最终以开路模式安全地退出电网, 并发出失效报警信号。

本技术可以使 SPD 像漏电保护器等其他低压电器一样接入电网, 不必再接入附加的安全保护措施。用户可以在大幅度提高了 SPD 自身安全防护水平的前提下, 减少附加安全保护装置的配置, 同时达到既提高了失效保护水平, 又降低了系统成本的双重目的。

2 压敏电阻陶瓷芯片的失效原因和失效模式

电涌保护器 (简称 SPD) 作为一种标准的低压电器, 广泛应用于低压输配电线路中, 可对线路中出现的由雷电等引起的电涌进行有效的吸收和抑制, 对改善电网输电质量、保证用电器安全具有明显的作用。

SPD 的核心部件是浪涌抑制元件, 最常用的是压敏电阻陶瓷芯片。由于输配电线路传输距离较长, 又容易暴露在露天, 相比室内电器设备工作环境更加恶劣, 在 SPD 的设计寿命期内, 压敏电阻陶瓷芯片更容易劣化失效。在使用条件不可控制情况下, 也是压敏失效的主要原因。由于压敏电阻容易出现短路失效模式, 一旦击穿失效, 就会引起供电线路短路故障, 击穿点会出现炸裂、冒烟、拉弧、严重时甚至会造成起火燃烧。

进一步分析压敏电阻陶瓷芯片的劣化失效原因, 发现绝大多数失效产品都是由以下三个原因造成的。

2.1 电涌冲击造成的压敏电阻陶瓷芯片的劣化

第一个原因是电涌冲击造成的压敏电阻陶瓷芯片的劣化。压敏电阻陶瓷芯片的微观结构是由无数的被晶界层包裹的氧化锌小晶粒所组成, 晶界层具有半导体效应, 陶瓷芯片可等效为由许多二极管串并联组成。增加陶瓷芯片的厚度就等于增加了串联二极管的数量, 可以提高压敏电阻的压敏电压, 增大陶瓷芯片的面积就等于增加了并联二极管的数量, 可以提高压敏电阻的电涌冲击耐受能力。

过度的电涌冲击将会给陶瓷芯片的晶界层造成不可逆的损坏, 串联方向的晶界层损坏, 压敏电阻呈现漏电流增加, 压敏电压下降的劣化特征; 并联方向的晶界层损坏, 压敏电阻耐受电涌冲击的能力下降。在实际应用中, 两个方向的劣化是同时发生的。判断压敏电阻陶瓷芯片的劣化程度, 通常是用压敏电压的变化率来衡量的, 变化率超过了 -10%, 一般就认为瓷体内部损坏严重, 抗电涌冲击能力明显下降, 进入快速劣化通道。此时, 一个中等强度的电涌冲击, 就可以使压敏电压值出现明显的下降。

电涌强度可大致分为三个区间, 它们对压敏电阻陶瓷芯片的破坏效果有所不同。

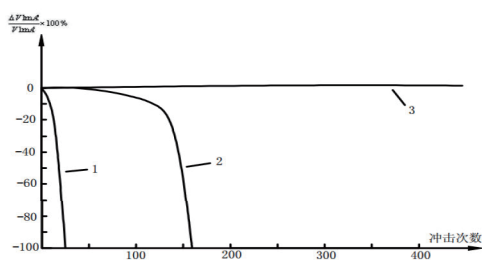
(1) 与压敏电阻陶瓷芯片极限电流耐受值相当的大能量电涌区间, 每一次电涌冲击都会造成陶瓷芯片的不可逆损伤, 漏电流和压敏电压值都会出现明显的劣化, 一般二十次左右的这种冲击就会将陶瓷芯片击穿短路。

(2) 电涌电流幅值大约在压敏电阻陶瓷芯片极限电流耐受值的 30 ~ 80 % 左右的中大能量电涌区间, 这种强度的电涌冲击陶瓷芯片几十次甚至数百次后, 陶瓷芯片才开始进入劣化通道, 一旦开始加速劣化, 二、三十次这种强度

的电涌就可能将陶瓷芯片击穿短路。

(3) 电涌电流幅值大约在压敏电阻陶瓷芯片极限电流耐受值的 30% 以下的中小能量电涌区间，这种能量强度的电涌即使冲击成千上万次甚至更多，也不会对陶瓷芯片造成明显的损坏，压敏电阻的压敏电压值不会出现明显的下降。

图 1 给出了 40K 系列压敏电阻陶瓷芯片在三个电涌能量区间的劣化曲线。



曲线 1-40kA；曲线 2-20kA；曲线 3-10kA

图 1 40K 系列压敏电阻陶瓷芯片电涌能量的劣化曲线

图 1 中纵坐标代表压敏芯片的劣化程度，以压敏电压的变化率来表示，横坐标代表电涌冲击次数。40K 系列产品的极限冲击电流为 40kA (8/20 μ s 波形)，图 1 中曲线 1 代表用 40kA 的极限电涌冲击的劣化曲线，曲线 2 代表用 20kA 的中高能量电涌冲击的劣化曲线，曲线 3 代表用 10kA 的中低能量电涌冲击的变化曲线。

在实际应用中，各种能量强度的电涌是混杂产生的，但从产生的概率来看是呈金字塔型分布，大量产生的是中小能量电涌，中大能量电涌产生的概率就大幅度减少，而大能量电涌产生的概率就非常小了。因此，选型合适的 SPD 压敏电阻陶瓷芯片，大部分都能够有效地工作到设计寿命期末。

但是，由于电涌产生的频次和强度的不可准确预测性，总是有少数陶瓷芯片被超出耐受能力的电涌冲击劣化，最终击穿短路。这种失效模式占了压敏电阻陶瓷芯片损坏失效的绝大部分比例，是压敏电阻损坏击穿的主要原因。击穿后的压敏电阻呈炸裂状态，表现出环氧包封层开裂、电极撕开、瓷体开裂并伴有电弧造成的焦痕等一种或几种外观现象；或者由于压敏电阻虽还没有彻底击穿，就因压敏电压下降太多而被电网跟随电流烧蚀出一个贯通性的孔洞，孔洞周围的环氧包封层被高温电弧烧焦碳化。

2.2 电网电压波动太大，造成压敏电阻陶瓷芯片过电压导通击穿

第二个原因是电网电压波动太大造成压敏电阻陶瓷芯片过电压导通击穿。这是由于压敏电阻器优良的非线性特征造成的。当电网电压的峰值波动太大，超过了压敏电阻的压敏电压值后，电网电压的微小升高，都会造成流过压敏电阻的电压跟随电流急剧增大，一旦超过了压敏电阻陶瓷芯片的额定功率后，陶瓷芯片就会因过热而击穿，击穿后的陶瓷芯片也呈烧蚀出一个贯通性的孔洞，孔洞周围的环氧包封层被高温电弧烧焦碳化的外观特征。

预防这种失效的最有效的方法就是提高压敏电阻的压敏电压值，在 SPD 行业通常选择压敏电压值为 620V 或 680V 的产品用于标称电压 220V 的电网线路中，它们的最大连续交流工作电压值分别为 385V 和 420V，可以有效地避免电网电压波动造成的失效。但是在一些恶劣的场合，例如风电、山区小水电等特定环境中，由于电网电压不稳定造成的压敏电阻失效概率会显著上升，甚至有可能成为失效的主要原因。

在实际应用中，还有可能出现这种情况，可以理解为第一个原因和第二个原因共同造成的失效，就是当 SPD 工作较长时间以后，达到其设计寿命的周期时，会有小部分工作在电涌频繁的环境下的 SPD，其中的压敏电阻陶瓷芯片已经严重劣化，但还没有达到启动失效保护措施的一段工作期间，有可能在这期间内被电网故障产生的过电压击穿短路。例如陶瓷芯片的压敏电压值刚开始启用时为 620V，应对高达 380V 的电网过电压没有任何问题，但使用期间由于电涌反复冲击的原因，到寿命期末压敏电压值劣化到二百、三百伏左右后，在正常电网电压 220V 时还能坚持工作一段时期，这期间再遇到 380V 的电网异常过电压就会被击穿短路。击穿后的陶瓷芯片也呈烧蚀出一个贯通性的孔洞，孔洞周围的环氧包封层被高温电弧烧焦碳化的外观特征。

2.3 由于压敏电阻陶瓷芯片存在制造缺陷造成的失效

第三个原因是由于压敏电阻陶瓷芯片存在制造缺陷造成的失效。其中最为常见的是产品受潮后劣化造成的短路失效，制造时环氧包封技术控制不好或者环氧包封材料抗环境温度快速变化性能不好，造成使用中出現微裂纹都可能引起陶瓷芯片受潮，受潮后压敏电阻会出现漏电流上升，压敏电压下降的劣化特征，严重时会出现短路击穿，击穿后也呈烧蚀出一个贯通性的孔洞，孔洞周围的环氧包封层被高

温电弧烧焦碳化的外观特征。

其他的制造缺陷还包括有瓷体缺陷、电极毛刺、电极脱落等。制造技术先进、管控有效的制造商可以把制造缺陷造成的产品失效率控制在几个 ppm 甚至更低。而设备简陋、管理粗放的厂家生产的产品就会带来高的失效率，甚至有可能成为产品失效的主要原因。

3 目前其他失效保护技术的缺点和不足

3.1 传统失效方式

鉴于压敏电阻陶瓷芯片短路失效后带来的严重后果，在 SPD 中都配置了失效保护装置，其中应用最广泛的保护技术原理如图 2 所示：

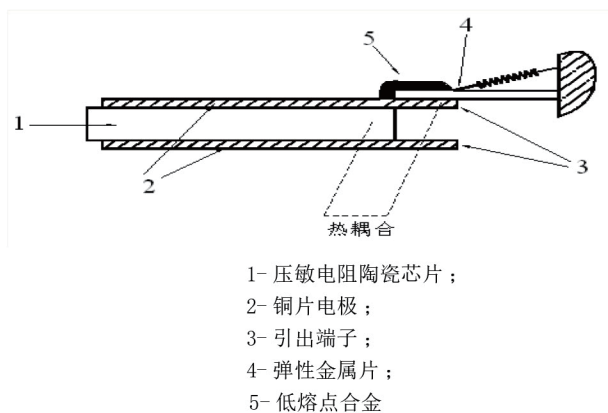


图 2 压敏电阻陶瓷芯片短路失效后保护技术原理

在压敏电阻陶瓷芯片 1 的两个端面电极上，分别焊接连接一片导电和导热性能都优异的薄铜片电极 2，薄铜片电极 2 预制有引出端子 3，薄铜片电极 2 在起到导电电极作用的同时也与压敏电阻陶瓷芯片 1 形成热耦合，能将压敏电阻陶瓷芯片 1 产生的热量传导到引出端子 3 上。在其中一个引出端子 3 上用低熔点合金 5 焊接一片弹性金属片 4 形成过热脱离器。当压敏电阻陶瓷芯片 1 劣化到漏电流进入毫安级时，开始进入加速劣化区，漏电流会使压敏电阻陶瓷芯片 1 发热促使漏电流进一步增大，又加速了压敏电阻陶瓷芯片 1 发热，最终将使压敏电阻陶瓷芯片 1 热击穿。当热量达到低熔点合金 5 熔断温度时，过热脱离器动作切断电源，使压敏电阻陶瓷芯片 1 在击穿短路前退出电网，达到了保护的目。这种失效保护技术简单，成本低，能够达到 GB 18802.1-2011 国标中对 SPD 热稳定性试验的要求。更有陶瓷芯片厂家进一步改进瓷片的均匀性，能够做到直接施加 2A 工频电流条件下，陶瓷芯片仍然能

够耐受到过热脱离器动作而不击穿短路，大大严于国标的试验条件。

但是，在实际应用中，仍然有相当数量的 SPD 是以短路故障的形式失效的。轻则造成线路停电，重则引起火灾事故发生。分析其原因，发现是由于实际应用中的失效模式与实验室热稳定性试验的试验条件有差异所致。

在实验室中，测试的样品都是未经使用过的新品，陶瓷芯片未受到电涌冲击的破坏，内部结构完整均匀，可以容易地通过国标规定的测试，甚至直接施加更大的工频电流也能合格。

而在实际应用中，压敏电阻陶瓷芯片有一个电涌冲击后逐步劣化的过程，压敏电压值从新品的 620V 逐步下降到 200 多伏以下后，才可以触发失效保护系统启动。此时陶瓷芯片的微观结构已经损坏严重，瓷体内存在许多晶界层被破坏的薄弱点，导致流过瓷体的电流密度不均匀，出现许多局部过热点使陶瓷芯片的热稳定性大幅下降，使得陶瓷芯片来不及发热到使过热脱离器动作就已经击穿短路了。极端情况就是由于此时陶瓷芯片的抗电涌冲击能力已经严重下降，一个较大的电涌就可以将它直接击穿短路，根本就没有发热的时间。

图 3 是为了模拟压敏电阻陶瓷芯片在实际应用模式下的失效保护效果而设计的验证电路。

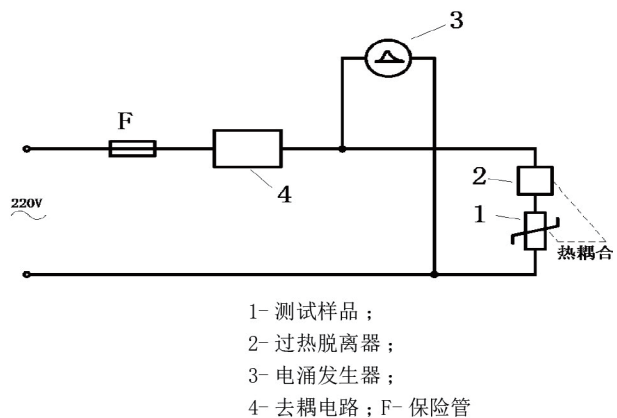


图 3 建筑物雷电防护区 (LPZ) 划分

图 3 中，被测试样品 1 与过热脱离器 2 热耦合，220V 工频电源通过过热脱离器 2 施加在被测样品 1 两端，同时接入电涌发生器 3，电涌发生器 3 与电源之间用去耦电路 4 隔开，阻止电涌逆向流入电源，在电源回路中串接有一个 20A 的保险管 F。

如果被测试样品型号为 40K 系列的方形瓷片，可以用电涌发生器产生 15 ~ 20kA 的电涌 (8/20μs 波形)，这

种电涌强度对应该型号属于中大能量电涌，若干次冲击后陶瓷芯片将进入劣化通道，直到完全击穿短路。在这期间，如果过热脱离器动作，切断电源回路，而同时保险管 F 不动作，就说明失效保护成功，系统为开路失效。反之，如保险管 F 熔断，而过热脱离器不动作或后动作，则说明是短路失效，失效保护失败。试验时要注意两次冲击之间的间隔时间要足够长，保证陶瓷芯片有足够的散热，避免累积升温造成过热脱离器误动作。

我们选取了部分压敏电阻陶瓷芯片（包括可以通过 2 安培热稳定性试验电流的芯片）制成如图 2 原理所示的带过热脱离器的试验样品，按照图 3 的试验方法进行了失效保护试验，结果发现不管新品的热稳定性能有多好，均有大比例的试例呈短路的形式失效，保险管 F 熔断。因此可以断定，此种结构的失效保护措施在实际应用中保护效果非常有限。

3.2 传统失效方式 + 耐电涌熔断器 + 后备脱离器

鉴于目前主流失效保护技术的不可靠性，SPD 的应用客户只得在 SPD 支路上串接一只抗电涌熔断器，当出现短路失效时，熔断器断开使 SPD 脱离电网。而熔断器的抗电涌能力要与 SPD 相匹配，例如针对 40K 系列的 SPD，熔断器的极限电涌耐受能力应为 40kA (8/20 μ s 波形)，这时它的工频熔断电流在 100A 左右，这么大的熔断电流还是不太安全，如果电源输出内阻偏大，导致熔断时间延长甚至不熔断，危险系数还会增大。因此，应用客户又推出一种后备脱离器串接在支路中，一旦出现脱离不了，后备脱离器动作使支路开路脱离电网。

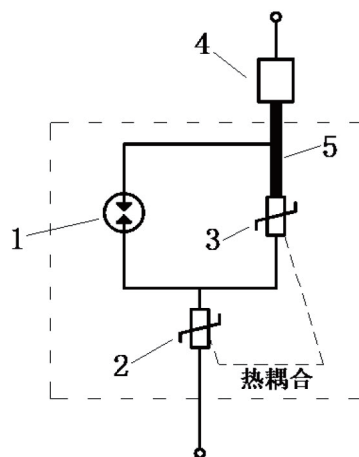
抛开这一套保护系统的可靠性不去讨论，我们姑且认为它的保护效果是可靠的，但至少它有以下三个缺点：

- 1) 系统复杂，三个分离的电器串接在一起，占用了更大的安装空间，使用了更多的连接导线，增加了系统的复杂性；
- 2) 成本高，单是外加的保护电器都会若干倍于 SPD 的价格；
- 3) 由于连接导线的增加导致的寄生电感的增加，将会明显地加大系统的残压，降低 SPD 系统的电涌限制能力。

3.3 资料一的组合电路

有资料介绍了一种组合电路，如图 4 虚线框内所示。

电路由放电管 1、压敏电阻陶瓷芯片 2 和正温度系数热敏电阻 3 串并联组成，其中压敏电阻陶瓷芯片 2 与正温度系数热敏电阻 3 热耦合。如果将热敏电阻的引出端做成低热阻导热端头 5，再与过热脱离器 4 连接，也可以用作



- 1- 放电管；
- 2- 压敏电阻陶瓷芯片；
- 3- 热敏电阻；
- 4- 过热脱离器；
- 5- 低热阻导热端头

图 4 一种组合电路

SPD 芯片。

与前面所述的传统的失效保护技术相比，由于电路中热敏电阻和压敏电阻存在热耦合，该技术具有两个优点：

(1) 当电网电压异常升高导致压敏电阻发热，热量传导到热敏电阻使其阻值变大减少了流过的电流，反过来又减缓了压敏电阻发热，电路耐电网电压异常波动的能力加强，极端情况下会在居里温度点上达到热平衡，如果使居里温度高于过热脱离器的动作温度，过热脱离器就会动作形成开路失效，只要放电管的直流击穿电压值足够高，电路就不会短路击穿；

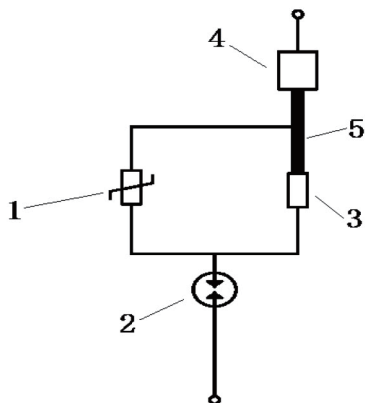
(2) 当压敏电阻开始进入劣化通道后，漏电流趋于进一步加大，温度趋于进一步升高，而热敏电阻的正温度特性则趋于电流随温度的升高而减小，这种相反的变化趋势互相抵消，就使压敏电阻的劣化时间得以延长，有充足的时间将发热温度传导到过热脱离器使其动作。

但是该技术有一个重大的缺陷，就是当压敏电阻进入劣化通道以后，其本身耐受电涌冲击的能力已经大幅度地下降，如果此时漏电流还没有大到使温升达到启动过热脱离器动作，一个较大能量的电涌就可能将其彻底击穿。此时放电管也处于导通状态，由于压敏电阻已被击穿，电涌消失后，电网续流就会使放电管返回不到断开状态，热敏电阻也会被短路失去作用，SPD 就会出现短路失效，采用图 3 所示的验证实验也证实了这种失效模式的存在。并且，处于热耦合状态的热敏电阻会延长压敏电阻在劣化通道中

的维持时间，在这期间遭受较大电涌冲击的概率要高于传统的失效保护技术，出现突然击穿短路的概率也会相应上升。

3.4 资料二的组合电路

还有资料介绍了另外一种组合电路的 SPD 芯片如图 5。



- 1- 压敏电阻陶瓷芯片；
- 2- 放电管；
- 3- 固定电阻；
- 4- 过热脱离器；
- 5- 低热阻导热端子

图 5 另一种组合电路

电路由压敏电阻陶瓷芯片 1、放电管 2、固定电阻 3、过热脱离器 4 和低热阻导热端子 5 串并联组成，其中压敏电阻陶瓷芯片 1 的耐受电涌冲击能力大于放电管 2 的耐受电涌冲击能力，并且压敏电阻陶瓷芯片的压敏电压值大于电网工作电压峰值。

该电路的优点是安排放电管率先击穿短路失效，而此时压敏电阻仍然完好，在电网中仍保持极低漏电流的高阻状态，放电管的短路电流被固定电阻限流在较小值，该电流使固定电阻发热，并通过低热阻导热端子传导到过热脱离器使其动作，达到开路失效的目的。

但是这个电路仍然存在两个严重的缺陷：

(1) 放电管与固定电阻是以串联的方式连接在电网中，当放电管被电涌导通后，支路中有电网电流流过，电涌消失后，该串联支路并不满足使放电管返回断开状态的充分必要条件，放电管有可能出现短暂无续流，严重缩短放电管的使用寿命，导致 SPD 的有效工作寿命缩短。当串联的固定电阻阻值过低时，续流会使放电管持续导通，固定电阻会发热使过热脱离器误动作脱离电网。在实际应用中，这种缺陷将会使该电路使用价值大幅下降。

(2) 由于压敏电阻属于电压限制型元件，放电管属于电压开关型元件，两者的工作原理不一样，劣化特征也不一样，造成在选择上不好匹配。例如，放电管耐受宽脉冲电涌的能力较优，为了在所有应用条件下都要保证放电管先失效，在宽脉冲电涌区间，压敏电阻的耐受能力还是必须得大于放电管，那么，在窄脉冲电涌区间，两者的电性能差距就显得太大，可能一个极限电流 40KA (8/20uS 波形) 的压敏电阻只能匹配一个极限电流 3-5KA 的放电管，极大地影响了电路的应用范围。

4 TMYL 系列高安全性 SPD 专用压敏电阻陶瓷芯片的工作原理和失效保护原理

鉴于目前现有的 SPD 失效保护技术都存在着一一定的缺陷和不足，我们研究开发了 TMYL 系列高安全性 SPD 专用压敏电阻陶瓷芯片，共分两个子系列，分别满足不同安全需求层次的客户。

4.1 TMYL1 系列产品

TMYL1 系列产品原理如图 6 所示。

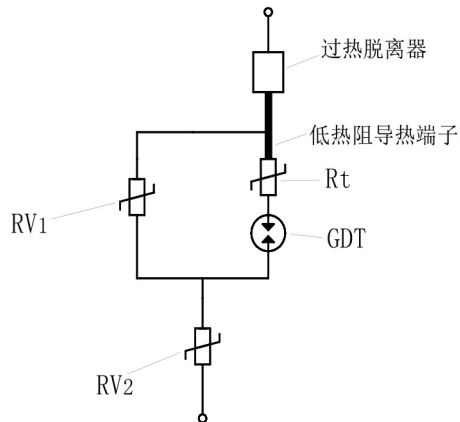


图 6 TMYL1 型电路图

(1) 两只压敏电阻器串联

核心技术思路就是将现有的单芯片压敏电阻陶瓷芯片改为两只压敏电阻器串联，分别命名为 R_{V1} 和 R_{V2} ，其中 R_{V1} 的耐受电涌冲击能力明显大于 R_{V2} 的耐受电涌冲击能力，在它们的串联点处抽头，连接热保护支路的放电管端，热保护支路由正温度系数热敏电阻 R_t 和放电管 GDT 串联组成，热保护支路的热敏电阻端与 R_{V1} 的另一个电极并联，并通过低热阻导热端头与过热脱离器连接，在这里 R_{V1} 的压敏电压取值要接近电网电压的峰值，以保证当串联的 R_{V1} 击穿短路后 R_{V1} 仍然维持在较小漏电流的高阻状态。

在最常见的 220V 电网中, R_{V1} 可考虑用两片 40K331 的方形陶瓷芯片并联组成, 其极限冲击电流值为 80kA (8/20 μ s), R_{V2} 可选择一片 40K391 的陶瓷芯片, 极限冲击电流值为 40kA, 过热脱离器的动作温度设定为 130 $^{\circ}$ C, R_t 选择常温阻值 100 Ω (零功率电阻值)、居里温度点高于 130 $^{\circ}$ C 的正温度系数热敏电阻器, GDT 可选择标称直流放电电压 230V、通流量 3kA 的放电管。所有元件焊接封装成一体以减小寄生电感。

(2) 人为制造电涌耐受能力的差距

通过人为制造电涌耐受能力的差距, 那么, 对 R_{V2} 来说是极限能量的电涌冲击对 R_{V1} 来说就只能算中大能量的电涌冲击, 对 R_{V2} 来说是中大能量的电涌冲击对 R_{V1} 来说就只能算中小能量电涌冲击, 由于它们的串联特性, 在 SPD 的整个寿命期内, 它们将会经受相同次数、相同强度、相同脉冲宽度的若干次电涌冲击, R_{V2} 必然会先于 R_{V1} 劣化击穿。实验证明, 如果按照上述的参数选择, 当 R_{V2} 被电涌击穿短路时, R_{V1} 的压敏电压值几乎没有变化, 也就是说, 它几乎没有劣化。

(3) 启动失效保护功能

当 R_{V2} 劣化击穿短路的时候, 就相当于启动了失效保护功能, 由于有呈高阻状态的 R_{V1} 阻挡, 短路电流只能通过热保护支路流入 R_{V2} , 热保护支路中的 R_t 将这个短路电流的初始值限制在 2A 左右, 并且随着 R_t 的快速升温, 该电流还将迅速减小, 直到在居里温度点上达到热平衡。产生的热量从容地由低热阻导热端头传导到过热脱离器使其动作, 最终形成开路失效。这种开路失效的原理清晰, 效果明显, 不失为一个非常好的设计思路。将按该设计方案制造的样品接入图 3 所示的验证电路进行试验验证, 所有试验样品均能够开路失效, 比之前的其他失效保护技术有突破性的重大进步。

在某些低端的应用场合, 例如民用住宅的单元或入户配电箱中配置的防雷 SPD, 配备传统失效保护技术的 SPD 也可以将后备脱离器省去不用, 抗电涌熔断器也可以由总控的空气开关来担任, 这时如果 SPD 出现了短路失效, 空气开关将跳闸断开, 并且重合不上, 必须由专业电工上门将失效的 SPD 拆卸下来, 才能够恢复供电, 给用户带来极大的不方便和安全隐患。此时, TMYL1 系列产品就显示出了它的优势, 可以作为更新换代产品, 基本杜绝短路失效的发生, 提高了用电质量, 降低了事故风险。

(4) 设计举例

本设计例的 $U_C=250V$, 是 R_{V2} 的最大连续交流工作电压值, 在电网出现异常波动过电压时, 由于热保护支路中的 GDT 可以分担部分电网电压, 可以补偿 R_{V2} 的过电压耐受能力, 电路可以按照 TOV 耐受模式通过 GB 18802.1-2011 国标中规定的低压系统故障引起的 TOV 实验。在完善的供电系统中, 过电压后由于继电保护装置的動作, 其持续时间很短, 一般不会超过 5s, TMYL1 系列产品完全能够轻松耐受。就算在一些不完善的供电系统中, 例如风电、农村电网等, 只要是按照本设计例的元件选型, 即使电网电压波动到 380V 并长时间维持, 电路也能够耐受并维持正常工作。

(5) 预防短路失效隐患

但是, 在实际应用中, 该电路还是存在一个可能产生短路失效的隐患, 虽然发生的概率极低。这就是会有一小部分工作在电涌频繁的环境中的 SPD, 当其工作到了设计寿命的末期, R_{V2} 已经显著劣化到接近击穿状态, 但能够在正常的 220V 电网中继续维持工作一段时间, 这期间如果电网突然出现 380V 的异常过电压, R_{V2} 就可能被击穿短路, 一旦 R_{V2} 被击穿, 异常过电压就会直接加在 R_{V1} 两端, R_{V1} 并没有设计成在异常过电压下也保持高阻状态, 因此, 也会立刻击穿导通, 并使热保护支路短路失去作用, 使 SPD 形成短路失效。在一些不允许出现短路失效的高端应用场合, TMYL1 系列产品的这一安全隐患限制了它的应用, 除非将 R_{V1} 的压敏电压值选到 560V 以上, 但这将带来残压上升几百伏的副作用。

4.2 TMYL2 系列产品

TMYL2 系列压敏电阻陶瓷芯片的电路原理如图 7 所示。

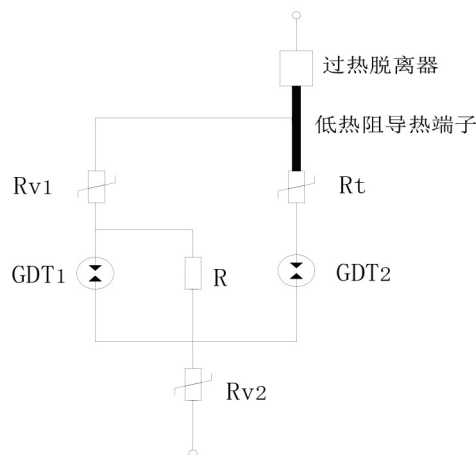


图 7 TMYL2 型电路图

(1) 增加了一个气体放电管 GDT_1 ，串联在电涌吸收主通道中。

如图 7 所示，TMYL2 系列产品就是在 TMYL1 产品的基础上增加了一个气体放电管 GDT_1 ，并串联在电涌吸收主通道中，为了与放电管 GDT_1 相区别，将热保护支路中的放电管命名为 GDT_2 。 R_{V1} 、 GDT_1 、 R_{V2} 依次串联在一起，在 GDT_1 与 R_{V2} 的串联点处抽头连接热保护支路的 GDT_2 端，热保护支路的 R_t 端与 R_{V1} 的引出端并联，并通过低热阻导热端头连接到过热脱离器，并联在 GDT_1 两端的电阻 R 起到调整工作电压分配的作用，在正常的无电涌工作状态下，将大部分的电网电压分配在 R_{V1} 和 R_{V2} 上。该电路的目的就是要克服 TMYL1 系列产品的缺陷，做到在 SPD 工作寿命的末期， R_{V2} 劣化后维持工作期间，遭遇电网低压系统故障过电压后，仍然不会出现短路失效的错误。

(2) 电路改进原理

该电路的改进原理也很简单，就是利用 GDT_1 较高的直流击穿电压值不会影响其导通后的残压值这一特性，当上述特定工作环境下出现电网异常过电压将 R_{V2} 击穿短路后，异常过电压将会由 GDT_1 和 R_{V1} 两只元件来分担，只要将 GDT_1 的标称直流击穿电压值选择在 350V 以上，这条包含 GDT_1 和 R_{V1} 的支路就可以耐受 380V 的电网异常过电压不会出现导通，这时 R_{V2} 的短路电流只能通过热保护支路的 R_t 限制流入，并启动过热脱离器动作实现开路失效。而正常工作期间，当电涌通过主回路将 GDT_1 导通后，其两端的残压值极低，可忽略不计，电路的残压值仍可看成是 R_{V1} 的残压值与 R_{V2} 的残压值之和。电涌消失后， R_{V1} 返回高阻状态，使 GDT_1 可靠地回到断开状态。在这里 GDT_1 的电涌耐受能力要大于 R_{V2} 的电涌耐受能力，以保证不会先于 R_{V2} 劣化失效。

如果将 GDT_1 的直流击穿电压值和 R_t 的耐压值（也可以几只串联提高耐压）选得足够高，理论上可以按照耐受模式通过国标规定的高（中）压系统故障引起的 TOV 试验。

(3) 大幅度地提高 SPD 的安全性

在许多重要的应用场合，例如通信机房及基站、高铁通信系统、大型连续生产设备、机场、医院、油库、安防系统、……，等的供电电源，都不允许出现停电故障。对防雷 SPD 系统的要求也非常高，不允许出现短路失效。相比之前已有的失效保护技术，TMYL2 系列产品的失效保护技术具有保护动作电流小灵敏度高、脱离动作安全可靠、失效报警信号清晰准确、全工作环境全寿命期覆盖、保护盲区无漏洞等明显的技术优势，可以大幅度地提高 SPD 的安全性，避免高安全性要求的重要应用项目出现因雷击

等突发原因引起的意外突然停电事故，及因停电事故造成的重大损失或恶性事件的发生。同时，摒弃了之前粗笨、迟钝、昂贵的附加保护装置，在提高失效保护水平的前提下，还可以降低防雷系统成本，具有良好的应用前景。

5 主要技术参数的测试方法和测试数据

5.1 测试方法

本设计方案的 TMYL1 和 TMYL2 系列产品，均需满足国标 GB18802.1-2011《低压配电系统的电涌保护器性能要求和试验方法》中涉及非线性元件的测试项目，以及 UL1449 要求限制电流异常过电压测试。我公司除了“高（中）压系统的故障引起的暂时过电压（TOV）试验”等个别试验项目不具备测试条件外，对其它的测试项目都进行了试验，均能够顺利通过。特别是“热稳定试验”项目，除了按规定用崭新样品进行测试能够顺利通过外，用做过其他试验项目的受损样品进行测试也能顺利通过，甚至按照更严格的如图 3 所示的模拟实际失效环境的测试条件也能顺利通过，比以前的保护方式，有了极大的进步。

测试样品的元件由以下参数组成： R_{V1} 选择两片 40K331 方形瓷片并联； R_{V2} 选择 40K391 方形瓷片；TMYL2 样品的 GDT_1 选择冲击电流 50kA、标称直流击穿电压 350V 的陶瓷气体放电管；TMYL1 样品的 GDT 和 TMYL2 样品的 GDT_2 选择冲击电流 3kA、标称直流击穿电压 230V 的陶瓷气体放电管； R_t 选择常温阻值 500 Ω 以内、交流耐压 250V、居里温度点大于 130 $^{\circ}\text{C}$ 的正温度系数热敏电阻瓷片；TMYL2 样品的 R 选择标称阻值不高于 100k Ω 、额定功率 2W 的电阻，所有元件一体式封装，以减小寄生电感。样品的 $U_c=250\text{V}$ ，芯片中由热敏电阻端引出的低热阻导热端头用 130 $^{\circ}\text{C}$ 的低温焊锡连接到弹性引线充当过热脱离器。

5.2 测试数据

每一个测试项目采用 3 只新的样品。具体测试数据如下。

(1) 按国标第 7.5 条确定限制电压试验。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

$$U_{P1} = 1482\text{V}; U_{P2} = 1517\text{V}; U_{P3} = 1462\text{V}.$$

b. TMYL2-40kAC250 测试结果

$$U_{P1} = 1508\text{V}; U_{P2} = 1510\text{V}; U_{P3} = 1451\text{V}.$$

(2) 按国标第 7.6 条进行动作负载试验（按 II 类试验要求），同时按 7.7.1 条进行过热脱离器的耐受动作负荷试验。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

$I_n = 20\text{kA}$, $I_{\max} = 40\text{kA}$, $U_C = 250\text{V}$, 按规定次数和时间间隔施加：

三只样品均通过预处理试验和动作负载试验，过热脱离器未动作。

b. TMYL2-40kAC250 测试结果

$I_n = 20\text{kA}$, $I_{\max} = 40\text{kA}$, $U_C = 250\text{V}$, 按规定次数和时间间隔施加：

三只样品均通过预处理试验和动作负载试验，过热脱离器未动作。

(3) 按国标第 7.7.2 条进行热稳定试验。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

按照试验要求先用铜线将 GDT 短路，再进行测试。

样品 1 在试验电流达到 40mA 时，过热脱离器永久断开。

样品 2 在试验电流达到 38mA 时，过热脱离器永久断开。

样品 3 在试验电流达到 40mA 时，过热脱离器永久断开。

b. TMYL2-40KAC250 测试结果

按照试验要求先用铜线将 GDT₁、GDT₂ 短路，再进行测试。

样品 1 在试验电流达到 36mA 时，过热脱离器永久断开。

样品 2 在试验电流达到 40mA 时，过热脱离器永久断开。

样品 3 在试验电流达到 42mA 时，过热脱离器永久断开。

(4) 按照图三所示电路，附加模拟实际应用环境下的热稳定试验。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

施加交流工作电压 $U_0 = 220\text{V}$, $I_n = 20\text{kA}$, 冲击间隔时间 5min。

三只样品的过热脱离器均在冲击到 100 次以上时动作脱离电网，保险管 F 未动作，样品呈永久断开状态。

b. TMYL2-40kAC250 测试结果

施加交流工作电压 $U_0 = 220\text{V}$, $I_n = 20\text{kA}$, 冲击间隔时间 5min。

三只样品的过热脱离器均在冲击到 100 次以上时动作脱离电网，保险管 F 未动作，样品呈永久断开状态。

(5) 按国标第 7.7.6 条进行在低压系统故障引起的 TOV 下试验。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

按照连接至 L-PE 模式，施加 $1.55U_{cs}$ 电压，时间 5s。

三只样品均以 TOV 耐受模式合格。

b. TMYL2-40KAC250 测试结果

按照连接至 L-PE 模式，施加 $1.55U_{cs}$ 电压，时间 5s。

三只样品均以 TOV 耐受模式合格。

(6) 附加模拟 SPD 寿命末期遭遇低压系统故障引起的 TOV 试验。

首先用 $I_n = 20\text{kA}$ 的实验电涌将试验样品冲击到 R_{V2} 的压敏电压降低到 300V 下，模拟 R_{V2} 已经严重劣化，再将实验样品接入图 3 所示的试验电路中，将交流工频电源电压升高到 380V，模拟电网低压系统故障引起的电压升高，以每 10min 一次的间隔时间施加若干次电涌冲击到 R_{V2} 短路击穿为止，此期间若熔断器 F 不动作而只是过热脱离器动作断开，样品以 TOV 故障模式开路退出电网则判定为试验合格；反之，若熔断器 F 先动作熔断，则不管过热脱离器动作还是未动作，均被认为是短路失效模式，判定为试验不合格。

a. TMYL1-40kAC250 测试结果

若干次电涌冲击后，三只样品均短路导通，导致熔断器 F 动作熔断，而过热脱离器未动作断开，样品均为短路失效模式，判定为不合格。

b. TMYL2-40kAC250 测试结果

若干次电涌冲击后，三只样品均以 TOV 故障模式合格。试验后过热脱离器永久断开，熔断器 F 未动作。试验后样品按要求在 U_C 下施加工频电压 1min，流过的电流小于 0.5mA，开路失效的目的达到。

在上述的 6 项试验中，第 1、2、3、5 项都是按照国标 GB18802.1-2011 的规定进行试验的。第 4、6 项属于附加的加严试验，但它们都具有非常重要的实用价值，第 4 项试验真实地反映了在实际应用中占失效比例最高的失效原因所产生的后果，虽然比国标的热稳定性试验更严格，但更符合实际失效模式；第 6 项试验的条件在实际应用中出现的概率极低，但在高端应用场合中也不允许这种潜在的隐患存在。

6 各种失效保护技术的性能、成本对比分析

将本文提到的各种失效保护技术的各项技术特征、经济特征汇集成表，便于分析比较。

表 1 列出以前已有的失效保护技术的技术特征和经济特征。表 2 列出 TMYL 系列产品的技术特征和经济特征。

电路保护元件

表 1 以前已有的失效保护技术的技术特征和经济特征

以前已有的失效保护技术	失效保护方式			
	传统失效方式 (图 2)	传统失效方式 + 耐电涌熔断器 + 后备脱离器 (图 3)	资料一电路 (图 4)	资料二电路 (图 5)
技术特征或经济特征	传统失效方式 (图 2)	传统失效方式 + 耐电涌熔断器 + 后备脱离器 (图 3)	资料一电路 (图 4)	资料二电路 (图 5)
应用环境	允许 SPD 出现短路失效的低端应用	不允许 SPD 支路出现短路失效的高端应用	允许 SPD 出现短路失效的低端应用	寿命短, 有误动作, 通流量受限, 限制了应用
实际应用中 SPD 开路失效的可靠性	不可靠	可靠	不可靠	基本可靠
失效时的保护动作电流值	短路失效时不受控	大	短路失效时不受控	中
失效时压敏瓷片表面的温升	高	高	短路失效时高	低
低压 TOV 耐受试验	耐受模式通过	耐受模式通过	耐受模式通过	耐受模式通过
SPD 寿命末期的低压 TOV 耐受试验	不能通过	故障模式通过	故障模式通过	不能通过
U_C 值	高	高	低	低
电网电压异常波动的耐受能力	高	高	低	低
残压	较高	高	低	低
安装体积	小	大	小偏厚	小偏厚
SPD 系统成本	低	高	中	中

表 2 TMYL 系列产品的技术特征和经济特征

技术特征或经济特征	TMYL1 (图 6)	TMYL2 (图 7)
应用环境	允许 SPD 出现短路失效的低端应用	不允许 SPD 出现短路失效的高端应用
实际应用中 SPD 开路失效的可靠性	基本可靠	可靠
失效时的保护动作电流值	小	小
失效时压敏瓷片表面的温升	低	低
低压 TOV 耐受试验	耐受模式通过	耐受模式通过
SPD 寿命末期的低压 TOV 耐受试验	不能通过	故障模式通过
U_C 值	低	低
电网电压异常波动的耐受能力	高	高
残压	较高	较高
安装体积	小偏厚	小偏厚
SPD 系统成本	中	中

7 结束语

我公司自主开发的 TMYL 系列高安全性 SPD 专用压敏电阻陶瓷芯片, 核心技术是在精心研究了压敏电阻失效机理的前提下, 有针对性地提出了串联在一起的 R_{V1} 的抗电涌冲击能力要明显大于 R_{V2} 的抗电涌冲击能力, 实现了在实际应用中确保让 R_{V2} 先短路失效, 同时串联主回路不会导通短路的核心思路, R_{V2} 的短路电流值和电流产生的温升都被 R_1 限制, 安全可靠地触发过热脱离器动作, 达到确保让 SPD 开路失效的预期目的。并在此基础上进行了一些改良, 形成了高端和低端两个子系列, 分别适应不同的应用领域, 方便下游 SPD 厂商控制成本。

作为压敏电阻陶瓷芯片的专业制造商, 多年来我们在这一领域积累了大量的经验和技能, 拥有经验丰富的研发团队和先进的生产线, 产品品质好, 技术创新能力强, 在本行业中享有较高的美誉度。希望能和下游厂商一起, 共

同验证推广该项技术, 促使 SPD 的安全水平迈上一个新的台阶。

参考文献

- 1 GB/T18802.1-2011 低压电涌保护器 (SPD) 第一部分: 低压配电系统的浪涌保护器性能要求和试验方法
- 2 UL1449 浪涌保护器 SPD 产品 Type4 检查项目 (第 4 版)
- 3 全宇辰. 浅析电涌保护器的安全问题. 防雷工程, 2018 年第 4 期
- 4 周歧斌. 智能 SPD 和后备保护脱离器 SSD 的标准化进程. 防雷工程, 2018 年第 4 期