

国外高能压敏电阻及其应用

Application of Overseas High Energy Varistors

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, 215000)² 中国科学院等离子体物理研究所 (合肥, 230031)Sun Dangfeng¹, Ji Youzhang^{1,2}¹Suzhou Diantong Power Electronic Co., Ltd (Suzhou, 215000)²Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (Hefei, 230031)

摘要: 本文介绍了国外高能压敏电阻的水平, 以及在电磁起重机、电流互感器、大型发电机、超导磁体、断路器、串联电容补偿、大电流熔丝、直击雷防护等方面的应用情况。

关键词: 高能量 氧化锌压敏电阻 应用 国外概况

Abstract: The paper introduces the level of high-energy piezoresistance abroad, and a general review of the application of electromagnetic crane, current transformer, large electric generator, superconducting magnet, breaker, in-series capacitance compensation, high-current fuse, and direct-thunder protection, etc..

Keywords: High energy, Zinc oxide piezoresistance, Application, General review over the situation outside china

[中图分类号] TN304.93 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349(2011)12-0047-09

1 引言

在国外, 高能压敏电阻最先用于电磁起重机和电流互感器。后来用于发电机灭磁和转子过电压保护, 提高了大型发电机励磁系统可靠性。还将其用在超导磁体移能, 断路器遮断, 串联电容补偿。用于大电流熔丝, 能够控制电弧电压发展。用在直击雷防护I类浪涌保护器(SPD), 比传统SPD压敏电阻具有更高的承受能力。

2 提高高能压敏电阻能量容量

国外于上世纪70年代末开发出来的高能压敏电阻, 其特点是吸收能量容量大, 制造方法与普通氧化锌(ZnO)压敏

电阻的制造方法基本一致, 由主原料氧化锌加入一些金属氧化物添加剂, 经陶瓷工艺制作而成的多晶半导体陶瓷。它与普通氧化锌压敏电阻不同, 是因它在制作上又做了进一步改进, 使其能量容量大大提高。

提高高能压敏电阻能量容量的途径有: 增大氧化锌晶粒尺寸, 改善整个电阻片的均匀性, 控制电极边缘的范围^[1-8,14]。

2.1 增大氧化锌晶粒尺寸

从微观结构来看, 高能压敏电阻的微观结构同普通压敏电阻片一样, 由氧化锌晶粒、晶界层和尖晶石三相构成。由于氧化锌晶粒的电阻率为(1~10) Ω·cm, 晶界层的电阻率为(10¹²~10¹³) Ω·cm, 所以, 施加在高压敏电阻上的电

压基本上是加在晶界层上,而晶界层的放热特性是依赖与其接触的氧化锌晶粒的热容量、热导率、放热特性等,因此,高能压敏电阻的能量容量近似由氧化锌晶粒的热容量决定。显然晶粒越大,高能压敏电阻的能量容量也越大。

增大氧化锌晶粒的途径:

(1) 选用二氧化钛代替三氧化二锑

调整配方,采用二氧化钛(TiO_2)取代抑制晶粒生长的三氧化二锑(Sb_2O_3),在烧结中增加氧化锌液相中的溶解度,有利于氧化锌晶粒的长大,可制出压敏电压小于100V/mm的高能压敏电压,比避雷器用氧化锌压敏电阻片压敏电压降低(1/2~1/3)。

(2) 籽晶(SG)法

该方法是将 $60\mu m \sim 100\mu m$ 的籽晶加入到和添加物的混合坯料中,然后加压成型,进行烧结。晶粒优先以籽晶为晶核生长,从而得到 $200\mu m \sim 500\mu m$ 的氧化锌晶粒,其压敏电压为15V/mm~6V/mm。

籽晶的制备方法是:将氧化锌(ZnO)和0.5mol%的碳酸钡($BaCO_3$),在滚磨机中滚磨2h,然后在 $800^\circ C$ 煅烧2h,煅烧后的粉末再滚磨12h,然后压制成 $\phi 14mm \times 3mm$ 的圆片,于 $1400^\circ C$ 烧结10h,将烧结体放入开水中煮数小时,经筛选便可得到细颗粒的籽晶。

因为在烧结中,碳酸钡($BaCO_3$)分解成氧化钡(BaO), Ba^{2+} 的离子半径(0.143nm)比 Zn^{2+} 的离子半径(0.075nm)大得多, BaO 偏析在晶界上,而且 BaO 是水溶性氧化物,因此在开水中煮成细颗粒。为了控制压敏电阻的晶粒尺寸和均匀性,应选用 $60\mu m \sim 100\mu m$ 的籽晶。

图1示出在含Ti系和含Sb系的坯料中,添加少量的籽晶可使非线性系数 α 显著地降低,籽晶添加量在(10~80)Wt%范围时, α 值变化不大(24左右)。当籽晶含量为80Wt%以上时, α 急剧地降至很小的数值。当籽晶添加量为10Wt%时,压敏电压为6V/mm。在含Sb系坯料中,籽晶添加量为(15~20)Wt%时,其 U_{1mA}/mm 约为20V/mm。

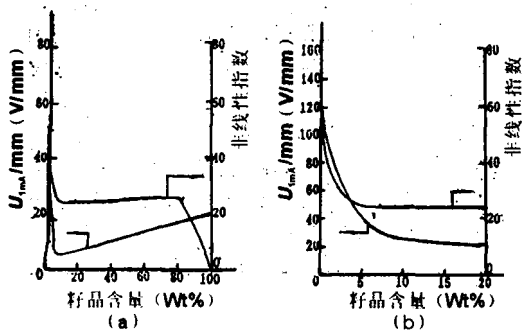


图1 籽晶含量与压敏电压和非线性指数的关系
(a) 含Ti系; (b) 含Sb系

(3) 提高烧结温度或延长保温时间

提高烧结温度或延长保温时间,可以使晶粒长大,使压敏电压 U_{1mA}/mm 降低,达到提高能量容量的目的。但是 Bi_2O_3 容易挥发而使非线性变坏。

2.2 改善电阻片的均匀性

高能压敏电阻吸收能量与其体积成正比。要满足一定吸收能量的要求,高能压敏电阻就必然要有比较大的直径。制造大直径压敏电阻片的关键是提高压敏电阻压敏电压 U_{1mA} 分布的均匀性。由于压敏电阻的电气性能具有高的非线性,微小的电压分布不均匀,会造成电流局部集中,容易导致热击穿。

改善电阻片均匀性的途径:

(1) 各组分混合充分均匀

主要从混合、造粒、成型、烧结工艺着手。要使添加剂混合均匀,原料不仅应粒度细、分散性好,而且要把握造粒料的颗粒形状、粒径和粒度分布及成型性能。在烧结时,温度的分布与周围的气氛也很重要。

例如,用细颗粒的胶体氧化锌($0.06\mu m \sim 0.15\mu m$)代替粉末氧化锌;用水溶性三氯化铬代替不溶于水的三氧化二铬,用水溶性的硝酸铝代替不溶于水的三氧化二铝,这些都可提高组分分布的均匀性。

按严格工艺控制做出的高能压敏电阻片,在80%面积上的1mA压敏电压分布偏差小于3%。用这种方法和传统方法制出的 $\phi 112mm$ 压敏电阻片的能量破坏试验结果表明,普通氧化锌压敏电阻片能量容量为6kJ,而高能压敏电阻片能量容量超过30kJ。

(2) 采用环形元件

环形元件成型压力分布均匀,可使坯体密度比较均匀。

(3) 进行热处理

压敏电阻进行热处理,可以改善微观结构的均匀性。

2.3 控制电极边缘范围

电极边缘的留边缘间距应尽可能减小,而且宽度应保持一致。边缘宽度(0.3~0.6)mm表现出最佳状态。

电极边缘尽可能作到圆滑规正。

通过控制电极边缘范围,改进边缘的平整光滑度,并改善了电阻片材料的均匀性,新的压敏电阻片比老电阻片能量吸收能力提高50%。

3 高能压敏电阻国外水平

目前,高能压敏电阻主要是日本、美国等国在研究,日本松下电器公司一直在研究生产^[3,13,14]。

(1) A系列J型高能压敏电阻

① 特征

a. 低的限制电压。

- b. 快速响应时间。
- c. 双边对称的V-I特性。
- d. 耐受能量大(5000J~44000J)。
- e. 没有续流。
- f. 压敏电压500V~1300V。

- b. 铁路车辆设备的开关浪涌保护。
- c. 电流互感器二次回路烧损保护。
- d. 可控硅、二极管整流电源设备的过压保护。

② 用途

- a. 电磁起重机的开关浪涌吸收。

③ 额定值

表1列出日本松下电器公司生产的A系列J型高能压敏电阻的性能额定值。

表1 高能压敏电阻A系列J型的额定值

型号	外形尺寸 φ × H (mm)	压敏电压 V _{1mA} (V)	最大允许工作电压		最大限制电压 V _{100A} (V)	耐受能量 (1次) (J)	耐受最大冲击峰值电流 (4 × 10 ⁻⁶ s 2次)(kA)	标准电容 kHz (pF)
			AC _{rms} (V)	DC (V)				
ERZ-A80JK 561	80 × 8	560 (505 ~ 615)	250	350	925	5000	80	9800
ERZ-A80JK561A						10000	80 × 2	19600
ERZ-A80JK561B						15000	80 × 3	29400
ERZ-A80JK561C						20000	80 × 4	39200
ERZ-A80JK112	80 × 16	1100 (980 ~ 1200)	485	680	1800	10000	80	4800
ERZ-A80JK112A						20000	80 × 2	9600
ERZ-A80JK112B						30000	80 × 3	14400
ERZ-A80JK112C						40000	80 × 4	19200
ERZ-A80JK122	80 × 18	1250 (1120 ~ 1380)	550	775	2070	11000	80	4400
ERZ-A80JK122A						22000	80 × 2	8800
ERZ-A80JK122B						33000	80 × 3	13200
ERZ-A80JK122C						44000	80 × 4	17600

注：a.使用温度范围：-25℃~+70℃；

b.保存温度范围：-25℃~+110℃；

c. 耐受能量：施加正弦波衰减波形(最大3Hz)1次，压敏电压V₁的变化±10%以内，便是能量的最大值。

④ 电压电流特性曲线

图2示出ERZ—A系列J型高能压敏电阻电压电流特性曲线。

尾长与浪涌施加次数的关系。

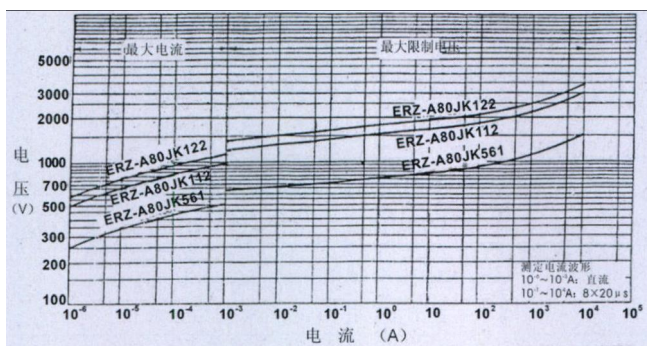


图2 ERZ-A系列J型高能压敏电阻电压电流特性

⑤ 试验方法和技术要求

表2列出ERZ—A系列型高能压敏电阻的试验方法和技术要求。

⑥ 浪涌寿命特性

图3示出ERAZ-A80J型高能压敏电阻浪涌电流、浪涌波

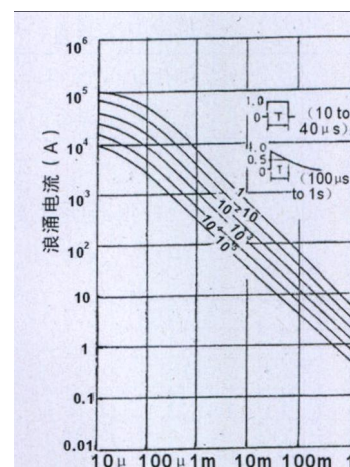


图3 ERZ-A80J型高能压敏电阻浪涌电流、浪涌波尾长与浪涌施加次数的关系

表2 ERZ—A系列J型高能压敏电阻的试验方法

项目	试验方法	技术要求															
标准试验状态	基本条件，温度20℃，相对湿度65%，气压1013mbar。如果发生疑义，在5℃~35℃、相对湿度45%~85%的环境条件下进行试验和测试。																
电气性能	压敏电压	将1mA直流电流通过压敏电阻ZNR后，其两端的压降称为压敏电压。测试时，为了避免发热的影响，要迅速进行。	符合额定值														
	最大限制电压	流过ZNR中的电流为规定值(8×20μs冲击电流波峰值)时，ZNR两端电压波峰值。	符合额定值														
	耐受浪涌冲击电流	将4×10μs的单极性冲击波电流，间隔时间为5分钟，两次流过ZNR， V_{1mA} 的变化率为±10%以内的最大电流值。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 10\%$														
	电压温度系数	周围环境温度为20℃以及70℃时，压敏电压的变化率，用%/℃表示。	-0.1%/℃以下														
	绝缘耐压	端子和金具间，施加AC 2500V(50/60Hz)1分钟。	不发生闪络														
	机械性能	耐振动性	将振幅为2.0mm(全振幅4.0mm)频率为1000r.p.m的单弦调和振动，沿着3个方向垂直进行2小时，用目视观察有无异常变化。	无异常变化													
耐冲击性		将11ms的半波正弦波，50g的冲击加速度，沿着3个方向垂直各加3次，用目视观察有无异常变化。	无异常变化														
耐候性能	高温放置	在110±3℃中，空载放置1000±12小时，取出后在常温常湿中放置1~2小时，测定特性。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 5\%$														
	湿中放置	在40±2℃，相对湿度90%~95%中，空载放置1000±12小时，取出后在常温常湿中放置1~2小时，测定特性。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 5\%$														
	温度循环	按照下表循环5次后，在常温常湿中放置1~2小时，用目视观察外观有无异常变化，并测定特性。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 5\%$														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>序号</th> <th>温度(℃)</th> <th>时间(分)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-25±3</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>常温</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>+7±2</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>常温</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	序号	温度(℃)	时间(分)	1	-25±3	30	2	常温	3	3	+7±2	30	4	常温	3
序号	温度(℃)	时间(分)															
1	-25±3	30															
2	常温	3															
3	+7±2	30															
4	常温	3															
	高温负荷寿命	在+70±2℃中，将最大允许回路电压连续施加1000±12小时后，在常温常湿下放置1~2小时，测定特性。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 10\%$														
	浪涌寿命	将规定波形的冲击电流的规定电流值(2ms,500A)流入ZNR 1000次，每次间隔时间10分钟。	$\frac{\Delta V_{1mA}}{V_{1mA}} \leq \pm 10\%$														

① 使用注意事项

在使用温度70℃以上，最大允许浪涌能量按图4负荷额定曲线。

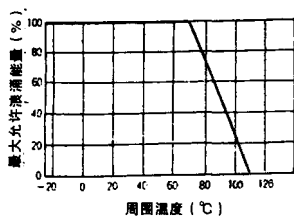


图4 ERJ-A80J型高能压敏电阻减定额曲线

(2) 直击雷防护用高能压敏电阻

日本音羽电气公司生产的高能压敏电阻直径φ74mm，厚度5mm，电压梯度90V/mm，放电能力500J/cm³。表3列出直击雷防护用I类压敏电阻性能。

表3 直击雷防护用I类压敏电阻性能

序号	项目	技术参数
1	最大连续工作电压 U_c	AC 230V
2	参考电压 U_{ref} (DC 1mA)	大于450V
3	线压(8/20μs, 25kA)	低于500V
4	放电电流 I_{imp} (10/350μs)	大于25kA
5	电荷释放能力	大于12.5C

4 高能压敏电阻应用

目前, 在国外现有的技术水平下, 由于高能压敏电阻可视具体被保护设备的条件、要求进行制作, 不受并联片数的限制, 应用范围越来越广。如电磁起重机、电流互感器、大型同步发电机、超导磁体、断路器、串联电容器、氧化锌熔丝、直击雷防护等。下面就国外高能压敏电阻的应用情况作一介绍^[9~14]。

4.1 电磁起重机电路中的开关浪涌吸收

电磁起重机电路图如图5所示。

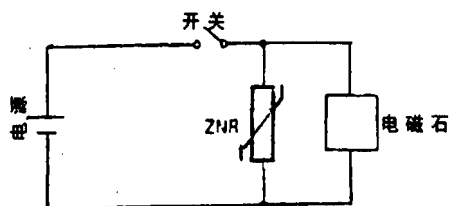


图5 电磁起重机电路

电磁起重机的开关产生浪涌给予吸收, 使接点得到保护。

4.2 电流互感器二次绕组保护

电流互感器线路图如图6所示。

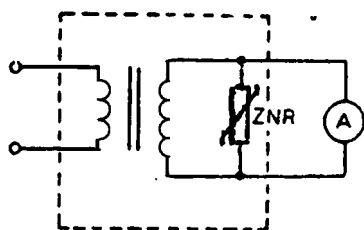


图6 电流互感器电路

电流互感器二次绕组断开时, 由于磁饱和而发热(铁损)烧损, 以及过电压而引起的二次绕组层间短路等事故得到保护。

4.3 大型同步发电机灭磁与过电压保护

大型同步发电机均采用可控硅励磁。在正常运行时用可控硅逆变灭磁, 事故状态下用灭磁开关, 通过转子放电回路进行灭磁, 灭磁系统的放电回路通常是与转子过电压保护回路共用可控硅与压敏电阻。图7示出发电机灭磁与过电压保护电路图。

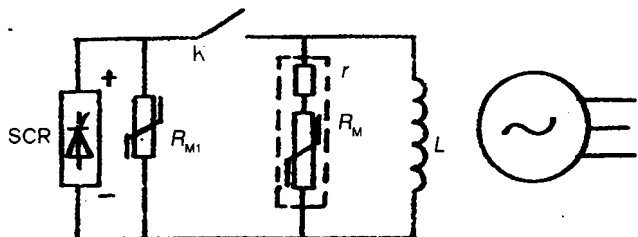


图7 电机灭磁与过电压保护电路

图中符号含义: SCR—可控硅励磁电源; K—励磁回路

开关, R_{M1} —高能压敏电阻(可控硅励磁电源过电压保护); R_M —高能压敏电阻; r —均流电阻; L —励磁绕组

日本研究采用高能氧化锌压敏电阻制作的高能浪涌吸收器(以下简称高能吸收器), 用于发电机的励磁回路, 采用24路(组)高能压敏电阻并联连接。为提高均流性能, 采用了线性电阻与高能压敏电阻串联的均衡电阻法。

研制的高能吸收器性能参数如下:

(1) 最高点限制电压: 3.5kV以下(1280A时);

(2) 吸收能量: 160kJ, 每路(组)压敏电阻吸收能量6.66kJ;

(3) 通电时间: 0.2s。

这种高能吸收器安装在发电机的励磁回路上, 由于实际动作是在工频电压下发生, 故所做试验均在交流电压下进行。

图8为分流试验时的电流波形图, 图中的电流值为通电2个周波后的值。

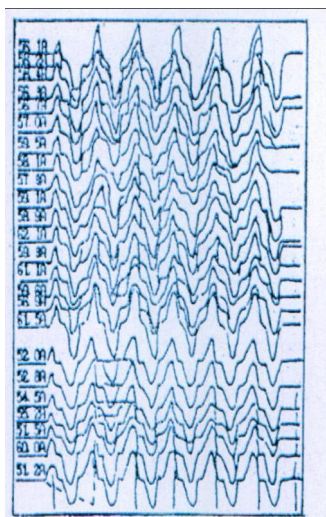


图8 分流试验示波图

该高能吸收器整体电流为1280A, 每路(组)58.3A, 压敏电阻间的最大电流与最小电流比为1.32, 最高点限制压为3.16kV(1280A), 整体的1/8能量试验结果见图9。

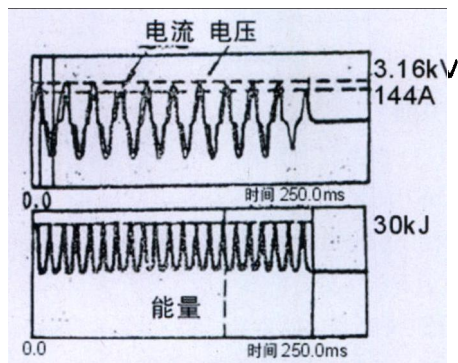


图9 耐受能量试验示波图

从图9中可见, 当电流144A, 通电时间0.21s时, 能量容

量为30kJ(相当于全部能量 $30\text{kJ} \times 8=240\text{kJ}$)。

4.4 超导磁体移能

由于超导磁体(线圈)中储有大量的能量,当某一点失超时,就会出现常态电阻,产生电阻损耗而发热。这样,所储存的磁能将迅速转变为热能,将低温容器中大量的液氮蒸发消耗掉,甚至烧毁超导线圈。因此,必须采取保护措施,将超导线圈中的磁能快速转移到移能装置上。用高能压敏电阻作为超导磁体移能元件,具有移能迅速,初始电压低,效率高、移能装置结构简单、安全可靠等优点。

用高能压敏电阻进行超导磁体的保护回路见图10。

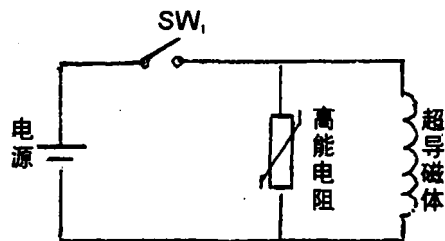


图10 超导励磁保护电路

图11、图12分别为采用高能压敏电阻与普通电阻,作为保护电阻时的磁体电流和电压的瞬态特性。可见,用高能压敏电阻作保护电阻时,放电时间可大幅度缩短。

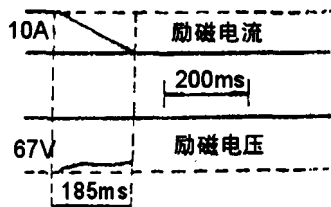


图11 用高能压敏电阻时的瞬态特性

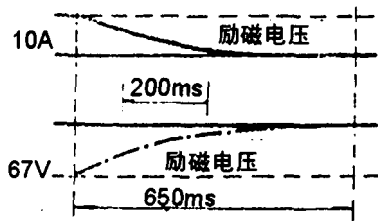


图12 用普通电阻时的瞬态特性

4.5 断路器开断

(1) SF₆压缩空气断路器

美国、瑞士研究的在800kV并联电抗器操作断路器触头间,采用高能压敏电阻限制断路器开断电流后两端的电压,以降低重燃引起的电抗器端部电压。

克劳沃德电站所用的断路器,是一个常规800kV SF₆压缩空气式断路器,其4个灭弧室各带有高能吸收器,由4个高能压敏电阻串联组成的高能吸收器,其能量吸收能力可达430kJ,高能吸收器的特性见表4。

表4 高能吸收器特性

序号	项目	技术参数	
1	最大额定电压	152 kV,rms	
2	最大连续运行电压	123kV,rms	
3	额定频率	60 Hz	
4	额定放电电流(峰值)	10 kA	
5	能量吸收能力	430.5 kJ	
6	最大压力释放故障电流值	50 kA	
7	型号	可在苛刻条件下工作的电站型(ANSI)。2级(IEC)无火花间隙。	
8	电气特性	限制电压(kV)	放电电流(A)
		250	1
		258	10
		264	30

(2) 直流可控硅断路器

日本研制的直流可控硅断路器,在直流电气铁道变电所和其它工厂可以取代传统的快速断路器。当可控硅断路器切断时,要求能量吸收器的电阻,一定要迅速增加到足以迫使电流在适当短的时间内降至零,但又不能太快,否则在电感中会产生高压。他们将高能吸收器用于1500V,3000A可控硅断路器。通过各种验证试验,结果表明,该能量吸收器完全可用于研制的直流可控硅断路器上。

这种高能吸收器,其每一个能量吸收器均由24个 ϕ 115mm、厚度15mm的高能压敏电阻组成,2片串联后12组并联的能量吸收能力可达400 kJ(每片16.67kJ)。

关于高能吸收器的能量试验,日本采用由电容器组和电阻组成的回路、产生的三角波电流注入到高能吸收器的方法,测定其能量吸收能力。当冲击能量20kJ时,高能压敏电阻可耐受10000次冲击。随着冲击次数的增加,高能压敏电阻的IV特性和限制电压会发生变化。

(3) 高压直流断路器

高能吸收器也可用于高压直流断路器。这种直流断路器的结构见图13。

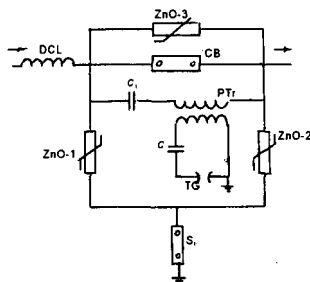


图13 直流断路器结构

图中符号含义：CB—断路器；PTr—脉冲变压器；C—换向电容器；TG—触发间隙或接通装置； C_1 —阻塞电容器； S_1 —开关；ZnO-1~ZnO-3—高能吸收器；DCL—直流电抗器

当触发间隙或称为接通装置(TG)动作时，高频振荡电流通过脉冲变压器(PTr)和阻塞电容器(C_1)注入到断路器(CB)，与直流电流相叠加，使在断路器(CB)中的电流为零，从而不要达到遮断电流的目的(人工过零遮断直流断路器)。

能量是储存在直流电抗器(DCL)的电感中，在遮断期间是以过电压形式施加的，此过电压通过高能吸收器(从ZnO-1到ZnO-2)抑制到(1.6~1.8)p.u.，随后开关(S_1)打开以阻止直流电压一直加到高能吸收器ZnO-1和ZnO-2上。如果高能压敏电阻在直流电压应力作用下寿命特性好，则并联开关(S_1)可去掉。

4.6 串联电容补偿装置

串联电容补偿装置，传统的短路过电压保护是采用由开关旁路的火花放电器和经由限制被旁路的放电电流的限流电阻。为了在短路切除后恢复线路，必须采用带有自动灭弧装置的放电器。由于高能吸收器是一种高能灭弧器件，故也可以用于串联电容补偿装置，保护线路见图14。

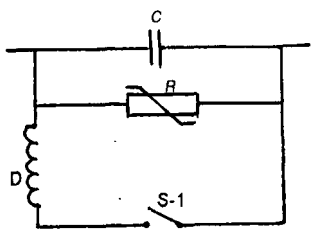


图14 串联电容补偿保护线路图

氧化锌保护系统比碳化硅保护系统简单，而且具有更高的可靠性，并在线路出现故障时不会取消电容的补偿。在保护逃逸能量15MJ、短路电流10.5kA线路上成功地进行了试验。

4.7 大电流氧化锌熔丝

美国研究了在轮流交替的整流设备上的应用。一个限流熔丝包括一个氧化锌芯片，和一组金属线熔丝元件的阵列，电气上并联连接，当电流遮断时，控制电弧电压发展，并能经受得住高的机械和电气应力。图15示出限流熔丝结构图。

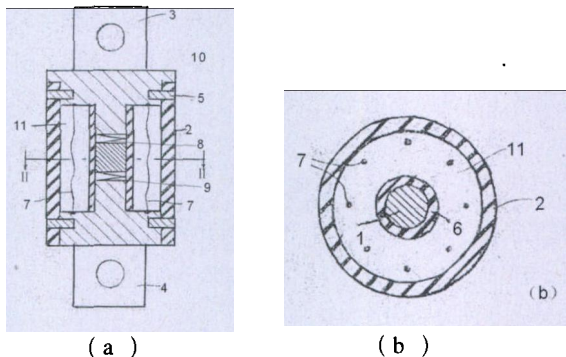


图15 限流熔丝图 (a) 限流熔丝剖面图；(b) 沿着II-II剖面图

限流熔丝10包括一个绝缘套筒2，电气导电端末端3和4，用销钉5扣缚在绝缘套筒。横过绝缘套筒是一个防护管6，在中央位置放置氧化锌圆柱体压敏电阻1，防护管6保持氧化锌圆柱体位置在两个电气导电端和防护管之间。8根金属线熔丝元件7具有相同的横截面，围绕氧化锌圆柱体1同轴排列。熔丝元件是电气联接到导电端末端3和4的、与氧化锌圆柱体并联。氧化锌圆柱体的长度是由要求的电弧电压限制水平所决定。弹簧接触器8和9在氧化锌圆柱体1末端和导电端3和4之间，在氧化锌圆柱体1和熔丝端部之间保持一个正的力，导电端部可以提供良好的电气接触。围绕防护管6和绝缘套筒2的内部，全部充填颗粒状的沙，增加支撑。

氧化锌圆柱体1与熔丝元件7的排列是并联的电气连接，提供电弧形状和控制特性。

图17示出氧化锌圆柱体的效果，与图16不控制电弧电压的熔丝设计作比较。

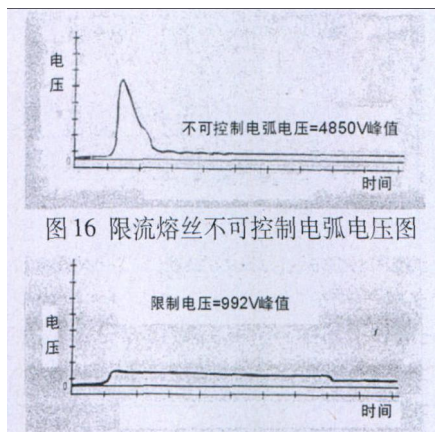


图16 限流熔丝不可控制电弧电压图

图17 限流熔丝用氧化锌圆柱体控制电弧电压

由图16看出，限流熔丝具有不可控制的电弧电压，产生一个电压波形具有4850V的峰值。然而，图17的一个类似的熔丝，包括1个氧化锌圆柱体控制电弧电压，限制电弧电压尖峰最大为992V峰值。

4.8 直击雷防护用I类浪涌保护器 (SPD)

根据IEC61312—1—1995 Part 1要求，直击雷电流波形为10/350 μ s。如果峰值电流相同，10/350 μ s波形的电荷量是8/20 μ s波形电荷量的(25~30)倍。所以，直击雷防护用浪涌保护器(SPD)的压敏电阻片要比传统SPD压敏电阻片具有更高的承受能力。

4.8.1 新开发的高能压敏电阻

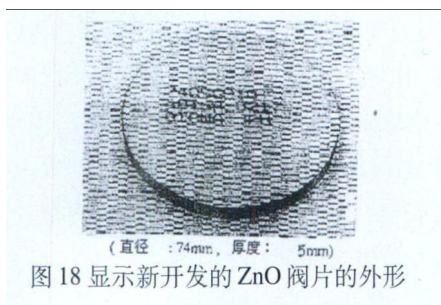
日本音羽电气公司制造了直击雷防护用I类浪涌保护器，高能压敏电阻片进行了大通流容量研究试验，冲击电流 I_{imp} 可达25kA和150kA。主要研究内容包括几方面。

(1)降低压敏电阻片的电压梯度 U_{1mA}/mm 。传统为200V/mm，新开发的用于防直击雷的为90V/mm。

(2)改进压敏电阻片的均匀性。提高压敏电阻的放电能力。传统为 $200\text{J}/\text{cm}^3$ ，新开发的为 $500\text{J}/\text{cm}^3$ 。

(3)改进电极设计。检测了压敏电阻片未覆盖电极的面积、与施加2ms周期方波电流时的放电能力之间的关系。对于直径 $\phi 74\text{mm}$ ，厚度5mm的压敏电阻片，选择未覆盖电极宽度是(0.1~0.3)mm。

图18示出新开发的ZnO压敏电阻片的外形。



4.8.2 直击雷防护用 I 类浪涌保护器技术性能

日本音羽电气公司研究开发的直击雷防护用I类浪涌保护器(SPD)的技术性能列于表5。

表5 直击雷防护用浪涌保护器的技术性能

序号	项目	技术参数
1	IEC(JIS)试验类别	I类
2	最大连续工作电压 U_c	230VAC
3	放电电流 I_{imp}	(1)25kA (2)150kA (1个SPD单元有3相3线)
4	电压防护水平 U_p	1.5kV
5	标称电压	450VDC

4.8.3 新开发的浪涌保护器 (SPD)

(1)LD-22E型SPD

浪涌保护器放电电流 I_{imp} 为25kA。

氧化锌高能电阻片连同电极一起用阻燃塑料壳封装，在氧化锌电阻片和外壳之间铸有防潮的塑胶。这种结构的SPD主要用在雷电频繁和雷电能量较大的地区。图19示出L-22E的轮廓图。

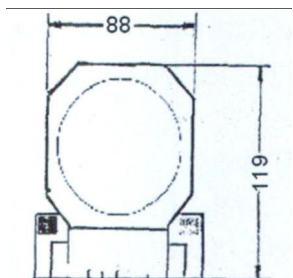


图19 示出L-22E的轮廓图。

(2)LD-25E3型 SPD

一个3相3线的SPD单元，总 I_{imp} 为150kA，每相 I_{imp} 为50kA。

SPD的氧化锌电阻片并列组装，它们由绝缘螺栓固定并封装在壳体内，在氧化锌电阻片和外壳之间涂敷了防潮用的塑胶。图20示出LD-25E3的轮廓图。

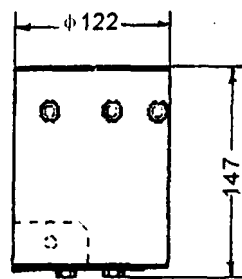


图20 LD—25E3的轮廓图

4.8.4 SPD 型式试验

这两种型号的SPD进行了型式试验，包括以下内容。

(1)运行状态试验

对于每一相施加10/350 μs 波形50kA峰值的冲击电流，所有电流波形正常，并且电流试验后，热稳定性没有变化。试验前后限制电压的变化在2.3%以内。

(2)热稳定性试验

按照加速老化试验进行，试验温度115 $^{\circ}\text{C}$ ，试验施加的电压因数为98%，施加电压持续时间为1000h。

漏电流在最初周期内逐渐增加，随后由于电压的施加，漏电流趋于减小。

(3)瞬时过电压(TOV)试验

按照IEC61643-1-1998中附录B和日本电工安装技术标准19条有以下内容：

$1200\text{V}+U_c=1200\text{V}+220\text{V}=1420\text{V}$ ，时间0.2s；

$600\text{V}+U_c=600\text{V}+220\text{V}=820\text{V}$ ，时间1s；

$300\text{V}+U_c=300\text{V}+220\text{V}=520\text{V}$ ，时间2s；

$150\text{V}+U_c=150\text{V}+220\text{V}=370\text{V}$ ，时间1h。

所有TOV试验显示均未发生损坏和热失控现象。

5 结束语

高能压敏电阻的发展动向，首先要考虑用户的需要，提高电流容量和能量容量，提高响应速度，扩大电压使用范围，提高限制电压特性，小型化、价廉等，力求高的可靠性。

参考文献

- [1] 松岗道雄，等. 电子材料，1977，第16卷，第2号，P.57
- [2] 松岗道雄，化学工业，1985，第2期，47~52
- [3] 日本松下电器公司产口目录

(下转第46页)

由于SiC JFET低器件电容潜在的“鸣响”振荡。这个概念并不新鲜，它与MOSFET首次引进时遭遇的要求一致。然而，如这里所叙述那样，高速、常闭型1200V、100A SiC VJFET半桥模块的高频振荡，可以通过设置RC缓冲器显著减小，在某些情况下甚至可以消除。用这种方法，在150℃下可以观察并测得1.25mJ的历史新低开关损耗。

5 致谢

封装在SP1模组中的半桥模块，由the Microsemi Power Products Group的一个部门组装。我们要特别感谢Serge Bontemps和Pascal Ducluzeau提供的封装监管和初始测试。

参考文献

[1] <http://www.microsemi.com/catalog/pack.asp?packid=SP1>
[2] R. Kelley, A. Ritenour, D. Sheridan, and J. Casady, "Improved

Two-Stage DC Coupled Gate Driver for Enhancement-Mode SiC JFET, Conf. Proc of APEC 2010.

[3] <http://www.pwr.com/pwr/docs/qjd1210006.pdf>
[4] J. Richmond, S. Leslie, B. Hull, M. Das, A. Agarwal, and J. Palmour, oadmap for Megawatt Class Power Switch Modules Utilizing Large Area Silicon Carbide MOSFETs and JBS Diodes, Conf. Proc. of Energy Conv. Congress and Expo, ECCE 2009. Nov. 2009, pp. 106-111.
[5] D. C. Sheridan, A. Ritenour, V. Bondarenko, J. B. Casady, and R. L. Kelley, "ow Switching Energy 1200V Normally-Off SiC VJFET Power Module," Conf. Proc. of ECSCRM 2010.

原文题目和作者

1200 V Enhancement-mode SiC VJFET Power Modules ,
Robin Schrader, Vlad Bondarenko, David C. Sheridan, Jeff Casady,
SemiSouth Laboratories, Inc., 201 Research Blvd.,Starkville, MS, USA

(上接第54页)

[4] A Sweetana, et al. Ceramic Transactions (Advances inVaristor Technical),Vol.3 ,P.240
[5] 莫以豪, 李标荣, 周国良, 半导体陶瓷及其敏感元件, 上海: 上海科学技术出版社1983年。
[6] 陈志清, 谢恒 . 氧化锌压敏瓷及其在电力系统中的应用. 北京: 水利电力出版社, 1992年
[7] K. Eda. J. Appl. Phys. 1978, 49(5), 2964?~2972
[8] H.Andoh , S .Nishiwaki , S.Boggs, et al. IEEE Transaction on Delivery, 2000, Vol.15, No.2,25~31

[9] 石乡冈猛, 等. 低温工学, 1989年
[10] J. G.. Reck leff, et al. CIGRE.1988 , 13~16
[11] S.Yanabu, et al. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS—101(7)1958~1964
[12] T. Jingenjo, et al. IEEE Transaction on PAS, 1983, Vol, PAS102, No51, P.1483
[13] Donald D.Blewitt, Penn Hills Township , Tapan K.Gupta. U. S.Patent 4528537, 1985~07-09
[14] 李永毅, 邱传睿. 雷电防护与标准化. 2004年第4期, 33~37

(上接第67页)

今后，电梯用驱动装置的市场动向是：主要针对原安装电梯中交流2速段的变频器化，以及需要更换变频器时和新安装电梯时的节省空间与节能省电。因而，采用永磁电动机驱动的要求愈益增加。已开发的L1000A变频器，为非常适应这一市场需求的、既节能又省空间的理想产品。

卷 第2号 (2009)
[3] 行武奇, 现代电梯变频器的技术要求, 《变频器世界》2009. 12月.P.66-68
[4] 陈家盛等, 现代电梯及其控制技术[M], 北京: 机械工业出版社.2001

参考文献

[1] 安川电机公司的调研报告
[2] 工藤雅一, 大屋广明, 则座 哲, 田中正城, 野中和浩, エレベータ用インバータL1000A,《安川 技 》第73

译者简介:

邓隐北(1937~)研究员, 五年本科, 主要研究方向为永磁电机的设计开发及电力电子技术应用。