

学术会议报告

阀型避雷器非线性并联电阻均压作用的试验分析

(1965年中国电机工程学会高压测量及试验技术年会)

李启盛 李 岱 曾伯文

水利电力部电力科学研究院

1965·10

內 容 提 要

近年来国产的带並联电阻的閘型避雷器，由于制造上的缺陷，有很多避雷器的电导电流在使用中逐渐下降，影响了避雷器的安全运行，我們对这些避雷器进行了一些試驗和分析，提出可以繼續使用的标准和使用的条件。

进行避雷器的电压分布試驗中得出，避雷器並联电阻使用非綫性材料制造对促使电压均匀分布是有利的。非綫性特性对电压均匀分布起了有利的調整作用，調整的特性主要表现在非綫性系統值 α 上面。兩元件串联使用时，要滿足相同的电压分布的要求，在非綫性电阻下比綫性电阻可容許較大的电导电流相差。元件的非綫性系数愈小和串联的各元件間非綫性系数相差愈小，对調整电压的均匀分布愈有利。

从試驗中还証明了，目前国产的带並联电阻的閘型避雷器元件串联使用时，灭弧电压及工頻放电电压下的电压分布主要由並联电阻决定。

从这些試驗分析中，提出了电导电流降低的元件在串联使用时应遵守的条件。

前 言

近两年来，电力系统中各运行单位在进行阀型避雷器的绝缘预防性试验中，普遍反映有很多带有并联电阻的PBC及PBBM型避雷器，其电导电流小于“电气设备交接和预防性试验规程”（以下简称规程）所规定的数值（400—650微安）。

根据63年及64年在东北、北京、天津、唐山、郑州等地调查，统计了组成110千伏的PBC型避雷器元件468节，其中有261节元件的电导电流小于400微安，占总数的56%；组成35千伏的元件736节，其中有218节元件的电导电流小于400微安，占总数的29.7%。所有不合格的元件当中，300—400微安的占92.5%，200—300微安的占7.5%。从这些数字看，不合格的避雷器所占的百分数是不小的，必须分析它的原因和所引起的影响，寻求解决的办法。

PBC型避雷器中并联电阻的作用，是使避雷器一个元件内的间隙组之间，和同一相避雷器内各个元件之间的电压分布均匀。在这种避雷器中，每四个火花间隙（或称为一个间隙组）均有一对半环形的电阻并联着，由于每对并联电阻的电阻值相同，因此在一个元件内各个间隙组之间的电压是均匀分布的。在同一相避雷器中，各个元件的并联电阻也相同，所以各元件之间的电压分布也是均匀的，这些并联电阻在出厂时均经过检验，以保证每对并联电阻的均匀性。在运行中假如并联电阻发生变化或损坏，就会影响电压的均匀分布。某一个间隙组或某一个元件上的电阻增大时，分布在其上面的电压也随之而增加。这种电压分布不均匀的情况会引起避雷器

工頻击穿电压的降低和容許的灭弧电压的下降，前者会导致避雷器在内部过电压下非正常动作而引起爆炸，后者会导致避雷器在动作以后不能灭弧，也会产生爆炸的情况。

这些避雷器中的并联电阻，是由金刚砂烧制的，它的电阻值，随电压的增加而变小，一般称为非线性电阻体。其电压与电流的关系大致可用下式表示：

$$U = c I^{\alpha}$$

式中 U —加在电阻体上的电压；

I —通过电阻体的电流；

c —材料的常数；

α —材料的非线性系数，一般在 $0.30 - 0.45$ 左右。

由于电阻值是随电压变化的，所以讨论电阻值必须是对应一定电压下的电阻值。一般不直接测量电阻体的电阻值，而只是加上一定电压下测量通过电阻体的电流。这个电流称为避雷器的电导电流。只要两个电阻体的电导电流相同，则其电阻值也相同。因此规程中只规定了电导电流的数值。

产生电导电流下降的主要原因，除极少数是由于并联电阻松脱或断裂而引起的以外（这种情况下电导电流将等于零或远小于 400 微安），大多数是由于制造工艺不良而引起的。这些情况，目前制造厂严格控制工艺过程已经有所改进，对于旧产品，假如按照 $400 - 650$ 微安的标准严格要求，则报废或检修的数量将很大，造成人力物力浪费。根据这一情况，我们抽取了一些不合格的避雷器元件，进行了大量试验工作，按照保证安全运行的条件进行分析，拟定了一个可以继

續使用的範圍和使用的條件。

由於並聯電阻是用非線性材料製造的，它與一般線性電阻不同，非線性電阻在均壓作用中與線性電阻有什麼不同，沒有看到過有關的試驗分析資料，在試驗分析中着重分析了非線性電阻在均壓作用中的特殊性，發現它在均壓過程中起着有利的調節作用，對非線性電阻的特性得到了進一步的了解。

一、PBC型避雷器直流電壓下電導電流的測量

在閘型避雷器的絕緣預防性試驗中，其電導電流的測量，均使用直流電壓。在這次試驗中，首先按規程進行直流電壓下的電導電流測量，其試驗結果與一般預防性試驗結果相同，只是在高壓側直接用靜電電壓表測量直流電壓。

按照規程規定，被試的30千伏元件應加上直流電壓2.4千伏以測量其電導電流；15千伏元件應加上1.6千伏。在這次試驗中，為了找出電導電流在各種電壓下的變化情況，在每個元件上加上規定的直流試驗電壓的40%、60%、80%及100%四個電壓值，分別測量它的電導電流。這些元件的電導電流數值如表1所示。

按照非線性電阻體電壓與電流的關係，在半對數座標紙上，電壓與電流的對數應該呈一直線關係。圖1是這些元件的電壓與電流的對數關係的典型曲線。

從表1中可以看到在30千伏及15千伏的元件中均有三個元件的電導電流是不符合規程所規定的數值的。其中電導電流最小的兩個元件只有280微安。另外，2號元件的非線性係數也太小。為了檢

查元件内部每个间隙组上并联的非线性电阻体的情况，又选择了一部分电导电流合乎标准的元件和一部分不合格的元件一起拆开，比较各对电阻体的电导电流。测得的电导电流数值列于表2中。

表1 各元件在直流电压下的电导电流数值

元件号	30千伏元件				15千伏元件			
	在下列直流电压(千伏)下的电导电流(微安)							
	10	15	19	24	7	10	13	16
1	30	94	182	380	60	145	300	530
2	7	60	165	420	51	115	240	420
3	51	128	235	435	52	125	260	470
4	34	101	205	410	54	128	265	480
5	35	103	210	425	27	73	151	280
6	35	101	200	410	27	73	160	304
7	35	100	200	400	36	88	171	308
8	24	71	145	293				
9	22	69	135	280				

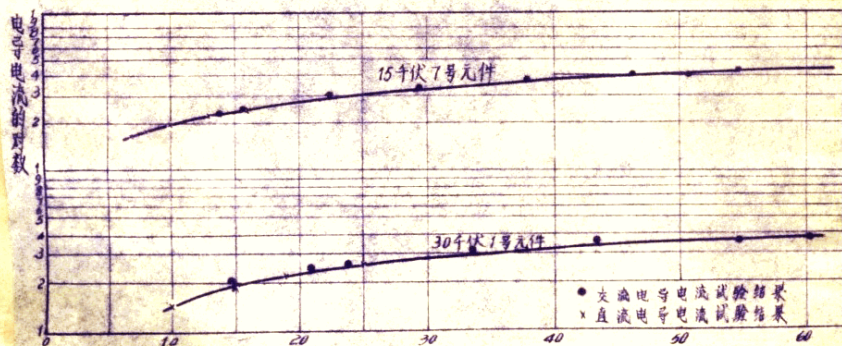


图1 30千伏及15千伏元件的典型伏安特性曲线

图1 30千伏及15千伏元件的典型伏安特性曲线

从表2中可以看到，不合格的几个元件中，有些元件中各对并联电阻体的电导电流是比较不均匀的。从各元件中取出并联电阻电导电流最小的一个数字，与该元件内电导电流最大的一个数字进行比较，算出相差的百分数，列于表2最后一列中。其中合乎标准的30千伏的3号元件典型数据中，差值为6.1%。其他不合格的元件中，差值最大的9号元件竟达到66.2%。

拆开元件中，30千伏的8、9号和15千伏的5、6、7号元件，其电导电流都在200—300微安及300微安左右。与规定的400—650微安（也是原出厂的数值）差别较大，因此内部的并联电阻可能发生较大的变化。拆开时对每对并联电阻进行试验，发现其中一些并联电阻的电导电流是比较小的，变化最厉害的是9号元件的第一对并联电阻，其电导电流只有148微安。

以后我们将分析，电导电流的差值达到66.2%是不能串联使用的，因此“电业技术通报”〔1〕规定电导电流为200—300微安的避雷器元件应拆开检查各組間隙的并联电阻的电导电流值是必要的。个别电导电流太小的应该更换。

表2 元件中各个间隙阻的串联电阻在直流电压下的电导电流
 在下列电压下的电导电流(微安)及非线性指数值(α)

元件号 间隙组号	30千伏元件									15千伏元件											
	3			2			6			9			5			7					
	2 千伏	4 千伏	α	2 千伏	4 千伏	α	2 千伏	4 千伏	α	2 千伏	4 千伏	α	2 千伏	4 千伏	α	2 千伏	4 千伏	α			
1	86	479	0.414	47	370	0.346	84	390	0.361	19	148	0.348	47	355	0.353	45	357	0.348	62	425	0.371
2	81	490	0.401	64	452	0.355	57	435	0.352	32	270	0.352	49	356	0.351	46	355	0.347	66	440	0.371
3	72	460	0.385	48	370	0.349	55	401	0.356	54	435	0.342	44	359	0.349	48	360	0.352	70	430	0.393
4	76	463	0.394	66	470	0.363	43	360	0.302	49	412	0.355	59	382	0.372	39	320	0.339	61	405	0.377
5	75	467	0.391	47	360	0.349	45	347	0.307	49	415	0.334									
6	85	468	0.406	47	355	0.343	54	425	0.341	55	417	0.352									
各间隙阻 α 最大相差值	0.029			0.022			0.059			0.020			0.023			0.013			0.022		
4千伏下最 大与最小电 导电流相差 百分数	6.1%			24.5%			20%			66.2%			6.8%			11.1%			12%		
$\frac{I_2 - I_1}{I_1} > I_3$																					

三 P B C 型 避 雷 器 交 流 电 压 下 电 导 电 流 的 测 量

閘型避雷器在使用中是处于交流电压的作用下的，所以在运行中的电压分布情况，实际上决定于交流电压下的并联电阻值过去由于較小的交流电流（1毫安以下）不易测量，一般不进行这一試驗。在这次試驗中，为了观察避雷器在最大运行电压及接近工頻击穿电压下的电压分布，进行了交流电压下的电导电流試驗。其試驗結綫如图 2 所示。

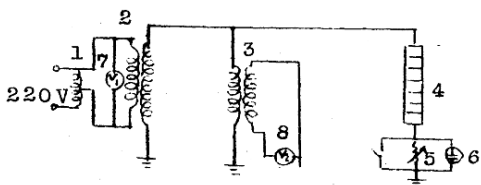


图 2 閘型避雷器的交流电导电流試驗結綫图

- 1—調压变压器，220伏，5千伏安；2—試驗变压器，440/50,000伏，5千伏安；3—电压互感器，35千伏及20千伏/100伏，2伏安，准确度0.2級；4—被测避雷器；5—可調电阻，0—99,999.9欧，0.3瓦，准确度0.5級；6—8BM-2型阴极示波器，电源由稳压器供給，电压波动范围 220 ± 1.1 伏；7—电压表，量程150、300、600伏，准确度0.5級；8—电压表，量程75、150伏，准确度0.5級

因为較小的交流电流不易测量，所以在試驗中采用测量电导电流

在电阻 Ω 上的电压降的办法。因为并联电阻体是非线性的，电导电流波形不是正弦形的，所以不能用一般测量交流有效值的电压表来直接测量电阻 (Ω) 上的压降。在试验中是采用阴极示波器测量这一电压的峰值。为了保证示波器现象板的灵敏度在整个试验过程中比较稳定，示波器的电源由稳压器供给，其波动范围为 $\pm 0.5\%$ 。

避雷器的电导电流的典型波形如图 3 所示。图 3 是 30 千伏的 3 号元件在额定灭弧电压下的电导电流波形。试验中还发现，在电导电流较小的几个元件中，有些元件在比较低的电压下，电导电流波形上有局部放电迹象。图 4 是 15 千伏的 5 号元件在 9 千伏（有效值）下的电导电流波形（该元件的额定灭弧电压是 16 千伏），箭头所指的是局部放电的痕迹。随着电压升高，这种局部放电情况就消失，到额定的灭弧电压值时，波形都是平滑的。



图 3 避雷器交流电导电流典型示波图



图 4 在交流电导电流下出现局部放电的示波图

这种局部放电现象可以用金刚砂电阻的物理结构来解释。图 5 画出金刚砂电阻物理结构和电气等值回路的示意图。整个电阻体是由无数小颗粒的金刚砂粘结在一起构成的（其示意图如图 5 (1)，在每粒金刚砂的表面上都有一层封闭层。封闭层的电导随外加的电压而改变，电压增大时，其电导增大得很快。另外，在颗粒间有许多很小的火花间隙，这些火花间隙在较高的电压下也形成通道，这也增加电阻体的电导。在正常情况下，这些金刚砂的颗粒是结合得很密切的，所以电导的改变看不出明显的突变过程。在这些不合格的元件中，有些并联电阻中的金刚砂颗粒结合得不够紧密，封闭层之间的接触点之间有小空隙，在低电压下构成有时击穿有时又复原的情况，因此在电导电流的波形图上出现小的毛刺。

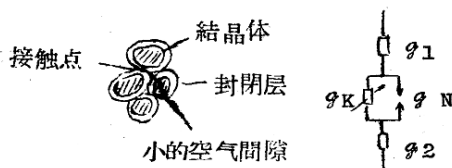


图 5 金刚砂物理结构和电气等值回路示意图

(1)物理结构； (2)电气等值电流

在交流电压下测得的电导电流与电压间关系的典型曲线，为了与直流电压下的电导电流相比较，也绘于图 1 中。电流与电压的数值均已化成峰值。

从图 1 的电压与电流对数的关系中可以看到三个特点：

(一) 交流电压下电压与电流数值之间的关系与直流电压下的情况基本上是相同的；

(二) 电压与电流的对数在半对数坐标纸上的关系并非完全是一根直线，亦即非线性的并联电阻电压与电流的关系式：

$$U = c I^{\alpha} \text{ 中 } \alpha \text{ 不是一个常数；}$$

(三) 曲线的斜率随电压的升高而逐渐变小，外加电压在元件额定灭弧电压的 1.8 倍（避雷器的工频击穿电压应为灭弧电压的 1.8 倍以上，所以亦即工频击穿电压的数值附近）。以上时，其非线性系数变得很小，在 0.1 至 0.2 左右。而在额定灭弧电压（24 及 21 千伏）附近，则为 0.3 至 0.4 之间。表 3 及表 4 中列出 30 千伏与 15 千伏元件非线性系数的变化，其数值是逐渐变小的。

在试验过程中，为了避免并联电阻发热而引起变质或损坏，超过元件额定灭弧电压的外加电压，均采取短时加电压的方法，加电压的时间不大于 1 秒钟。

交流电压下电压与电流数值之间的关系与直流电压下基本上相同的情况表明，在预防性试验所采用的电压下，并联电阻还不致引起发热而使电阻值发生变化（金刚砂制成的非线性电阻其电阻值随温度升高而降低）。因此，直流与交流电导电流的波形虽然不同，但电阻值还是相同。同时也证明直流下的电导电流试验所规定的电压是适当的。

表3 30千伏元件非綫性系数的变化

元件号	在下列电压(有效值)区间的非綫性系数值(α)		
	15—24千伏	31—43千伏	39—43千伏
1	0.320	0.286	0.257
2	0.239	0.257	0.199
3	0.337	0.267	0.206
4	0.321	0.283	0.224
5	0.300	0.263	0.171
6	0.340	0.249	0.209
7	0.340	0.253	0.207
8	0.300	0.332	0.213
9	0.292	0.261	0.217

表4 15千伏元件的非綫性系数的变化

元件号	在下列电压(有效值)区间的非綫性系数值(α)		
	16—21千伏	27—39千伏	36—39千伏
1	0.307	0.184	0.085
2	0.295	0.187	0.077
3	0.298	0.185	0.084
4	0.293	0.187	0.078
5	0.295	0.239	0.141
6	0.298	0.228	0.119
7	0.331	0.244	0.127

交流电压作用在两个串联的避雷器元件时,通过避雷器的电流包括通过并联电阻的电导电流和通过間隙的电容电流两部分,由于

並联电阻是非綫性的，电阻值不固定，所以电压与电流的关系不能用两个元件某一情况下的电阻值疊加計算，而應該取决于下面几个方程式的联合解，即：

$$U = CI^\alpha$$

$$U_1 = C_1 I^{\alpha_1}$$

$$U_2 = C_2 I^{\alpha_2}$$

$$U = U_1 + U_2$$

式中 U ， U_1 ， U_2 一在兩元件上的总电压及分布在元件 1 和 2 上的电压；

C ， C_1 ， C_2 一兩串联元件的总材料常数及元件 1 和 2 的材料常数；

α ， α_1 ， α_2 一兩串联元件的非綫性系数及元件 1 和 2 的非綫性系数；

I 一通过兩串联元件的电流。

U 与 I 和 C_1 、 C_2 、 α_1 、 α_2 的关系是一个比較复杂的关系式，用計算来确定这些关系不太方便。用作图法来确定却比較简单，只要将两个元件的伏安特性在半对数坐标紙上作出，然后按通过两个元件的电流相同这一关系，疊加各个电流下两个元件上的电压，即可得到加在两个元件上的总电压和兩元件串联后並联电阻的伏安特性曲綫。

通过避雷器内部間隙的电容与外部杂散电容的电容电流是很小的，我們曾試驗过当两个元件串联时，在交流額定灭弧电压下，总的电容电流不超过 50 微安（峰值），但在同样的电压下通过並联电阻的电阻性电流却达到了 1000~2000 微安（峰值）。这两者之

和又是向量和，所以电容电流实际上可以忽略，由于忽略电容电流而引起的数量误差不超过 0.5%。为了进一步证明这一点，曾将额定电压为 30 千伏的 3 号及 8 号元件串联，实测两元件串联之后

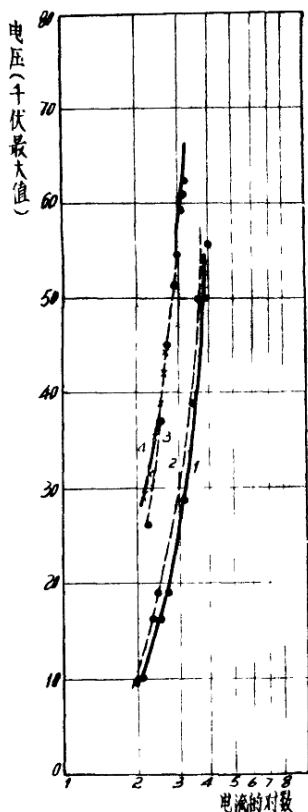


图 6 30 千伏的 3 号及 8 号元件串联的伏安特性曲线

1—3 号元件，2—8 号元件；3—作图叠加；4—实测曲线。

的电压与电流之间的关系。实测的电压与电流关系的曲线绘于图 6 中。图中同时绘出两个元件单独测量的电压电流关系曲线，和按作图法叠加所得的曲线，从图中可以看到除了在低电压下的一段外，实测所得的曲线与作图叠加的曲线是吻合的。因此串联元件的总电导电流基本上是由并联电阻的电导电流决定的。

从交流电压下电导电流的试验中可以得到下面几点有用的结论：

(一) 交流电压下的电导电流，若电压与电流均以峰值计算，它和直流电压下的情况基本上是相同的。因此，运行情况下的电导电流和后面用交流电压进行试验和计算的结果，同样适用于直流电压下的电导电流，故可用预防性试验测得的电导电流进行计算分析；

(二)並联电阻的非綫性系数值是逐漸變小的，电压愈高非綫性系数愈小。以后的分析將証明，非綫性系数愈小，对促使各元件的电压均匀分布愈有利。因此只要分析証明了較低电压下电压的分布能夠达到安全运行的要求，更高的电压就可以不再分析；

(三)在两元件串联时，並联电阻的电导电流起主要作用，間隙的电容电流可以忽略。因此在电压分布的計算和分析中，可以忽略电容电流所起的影响。

三、PBC 型避雷器两元件串联时的电压分布

两个非綫性电阻串联时，其电压分布与一般綫性电阻的情况不同。在綫性电阻的情况下，由于电阻数值是恒定不變的，所以电压分布只随电阻值成正比分布，而且是在各种电压下都是固定不變的。在非綫性电阻串联的情况下电压分布随电阻值成正比，但电阻值又随加在它上面的电压成反比，所以彼此間不是单一的函数关系。在这次試驗中，就是要用試驗实测和理論分析的办法确定非綫性电阻串联时电压分布的情况，探求两个或多个避雷器元件串联时，需要遵守的条件。

(一)两元件串联时的电压分布測量試驗

在这次試驗中，曾用电导电流相差較大的几个元件，分成几种不同的情况串联在一起，測量其电压分布情况。測量所用的元件及串联試驗情况如表 5 中所列，測量所用接綫图如图 7 所示。

試驗中发现由于通过並联电阻的电流不是正弦形的，所以在总电压是正弦形的情况下，其中一个元件上的电压分布不一定是准确的正弦形，使用靜电电压表測量其有效值的方法並不适用。另外，使用一些需从主回路中取出較大电流的仪器（如电压互感器）也能引起很大的誤差。經過比較以后确定使用球間隙測量电压分布的峰值。

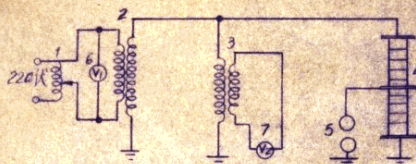


图7 测量元件间的交流电压分布的接线图
 1—调压变压器，220伏，5千伏安；2—试验变压器，440/5000伏，5千伏安；3—电压互感器，35千伏及20千伏/100伏，准确度0.2级；4—被测避雷器；5—测量球间隙，直径5厘米；6—电压表，量程150、300、600伏，准确度0.5级；7—电压表，量程75、150伏，准确度0.5级。

图7 测量元件间的交流电压分布的接线图

1—调压变压器，220伏，5千伏安；2—试验变压器，440/5000伏，5千伏安；3—电压互感器，35千伏及20千伏/100伏，准确度0.2级；4—被测避雷器；5—测量球间隙，直径5厘米；6—电压表，量程150、300、600伏，准确度0.5级；7—电压表，量程75、150伏，准确度0.5级。

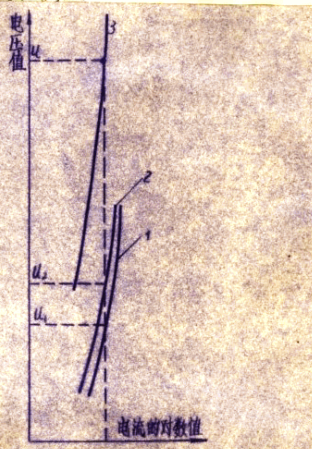


图8 用作图法确定电压分布的方法

1—元件1的伏安特性；2—元件2的伏安特性；3—两元件串联的伏安特性； U —总电压； U_1 —分布在元件1上的电压； U_2 —分布在元件2上的电压；