串联阻尼电容分压器的基本原理和通用分压器

马　乃　祥

（西安交通大学）

提　　要

在综述冲击电压分压器的发展史的基础上，阐述了串联阻尼分压器的基本原理。说明分压器为同时满足交流电压和脉冲电压的测量时，其参数的选择条件和最佳阻尼分压器与低阻尼分压器的区别，並介绍了通用分压器。

一、分压器的发展史

串联阻尼电容分压器是在纯电阻、纯电容和阻容混合分压器的基础上发展起来的，主要是电力系统电压高了，各种电气设备的试验电压也高了，作用电压的波形陡度大了，对测试准备度的要求严了，生产上的需要促进了技术上的进步。既然如此，有必要回顾一下高压分压器的发展历史。

30年代初期 Rogowski〔1〕等开始研究分压器的特性，当时把它看作集中参数来研究。不久 Bellaschi〔2〕首先阐明电阻分压器造成被测电压畸变的原因是对地电容的存在。自此以后到60年代的整整卅年期间，分压器的进步总是和减少对地电容的影响联系在一起，由此出现了各色各样的调整方法：

Hagenguth〔3〕建议在电阻分压器的顶上装伞（图1），让一部分经过对地电容 C_e 流入地中的电流通过 C_s 来补偿，这样可以降低分压器上部的电位梯度，而使沿分压器正体高度上的电场分布均匀化。但这样的改善受到伞的尺寸的限制，分压器高度越大，改善效果变差。

Elsner〔3〕和 Zinke〔4〕放弃了上述补偿的方法而用了代替的方法，索性在电阻上并联远比对地电容为大的电容来削弱 C_e 的影响，即阻容混合分压器(图2)，它的变换特性基本上接近电容分压器。后 Griscom〔5〕减小并联电容且作不等值的并联（上大，下小），得到比较好的结果。

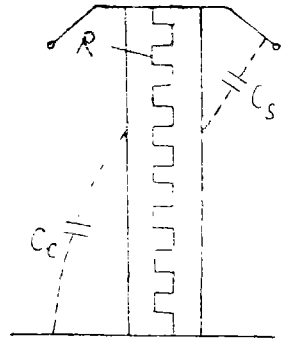

图 1　带伞状屏蔽的电阻分压器

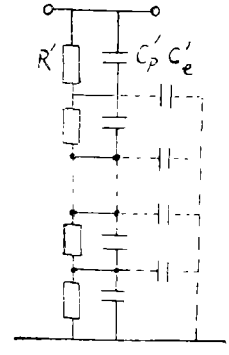

图 2　阻容混合分压器

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Goossens和Provoost〔6〕找了一条新路（图3），在沿分压器高度上把电阻作不均匀分布，收到了极好的效果。1兆伏分压器的总电阻为30千欧，响应时间为20毫微秒。

在对电阻分压器调整过程中引进的并联电容C_p，它和引线的电感L组成了串联谐振回路，因而在脉冲电压的传递过程中引起强烈振荡。Fisher〔7〕想出了解决的方法，在引线中串入一电阻R_d，把它放在分压器顶端到伞之间（图4）。这种分压器当伞的尺寸合适时有一个极小的响应时间，但它有一个缓慢上升的大的过冲。它是时间常数变化的结果，此时间常数是R_d和调整电容C_s的乘积，R_d的引入增强了C_s的时延作用，其他有关电阻分压器的调整问题可见文献〔8〕〔9〕〔10〕。

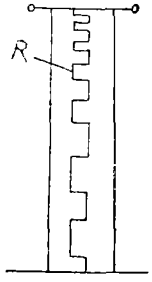

图3　不均匀电阻分压器

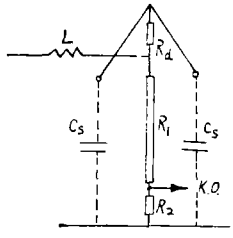

图4　入口处串有R_d的电阻分压器

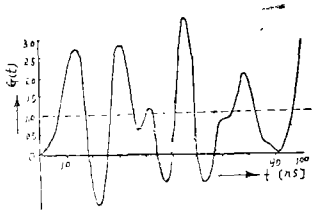

图5　纯电容分压器上的方波响应

60年代前后出现了总电阻为1—2千欧的低阻分压器，用它测量小于1μs的陡脉冲〔11〕〔12〕〔13〕，此时电源容量要比较大，分压器本身释能是问题。对高阻值的分压器，做成小尺寸放在高气压下〔14〕，遇到的也是能量消散的困难，所以二者都未能在一般冲击电压下普遍使用。近年来日本研究了高阻小尺寸分压器，放在油中，但响应时间还不理想〔15〕。

纯电容分压器目前都不用来测量陡波，因为分压器本身和整个测量回路的电感总是存在的，极易产生高频振荡。如图5〔16〕为一个额定电压为1兆伏高2.5米的电容分压器的响应曲线，其固有频率约为30兆赫，它的周期已远小于标准冲击波的上升时间。另方面，即使精心设计测试回路，在引线上串入阻尼电阻，这一振荡也难完全消除，而过大的阻尼将得出不合适的变换特性。因此Zaengl〔17〕在详细分析了分压器各部分电容、电感、电阻对变换特性的影响之后提出了串联阻尼电容分压器（简称阻尼分压器）。

二、串联阻尼电容分压器

任何一个冲击电压作用在分压器上，由于分压器本身的电感L和对地电容C_e的存在，电压波通过分压器时形成多次反射而呈现振荡，它直接影响了分压器的变换特性，仍以图5为例，其振荡频率：

$$f=\frac{1}{2\sqrt{LC_e}}$$

$\sqrt{LC_e}$就是电压波通过分压器所需的时间，称分压器的波行时间。不论什么类型，每个分压器都有一个波行时间，目前在我们高压测试技术中，高2.5米额定电压为1兆伏的分压器其对地电容约为40微微法，而电容或电阻的总电感约2.5微亨，於是它们的波行时间为10^{-8}秒，波以光速3×10^{8}米侵入则10^{-8}秒经过的长度正好接近分压器的高度。因此波行时间直接影响高频电压的传递，供理论讨论而作的等值回路必须以它为出发点，即不能光考虑

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对地电容C_e的影响而忽略电容器和无感电阻的L所起的作用。Zaengl以前对电容和电阻分压器的理论分析往往都把L简化了，所以只能得出有限的结果。

既然波行时间是L、C共同作用的结果，分压器的等值回路不能用集中参数来处理，必须将分压器看成是许多小单元组成，而每个单元的组件都有相同的波行时间。

图6为供研究用的等值回路。注意到实际情况：如分压器往往带有伞状屏蔽罩，低压部份对高压部份的阻抗比远小于高度比，测量电缆的存在和讯号的引出使低压部分是有负荷的等等。因此作元件均匀分布的等值回路时，要考虑到这些偏差，合理地选择各元件的参数。

C_e'为每小单元对地电容，沿高度方向的平均值取约15微微法/米。

Z_e'为一个C_p'和由R'、C'和L'串联的并联阻抗，R'、C'是分压器固有值，L'是不希望的但是不可避免的，只能尽量减小，在电阻分压器上决定于电阻线的绕法和所取单元的大小，一般用L/R来表示，中值电阻时取10毫微秒，低电阻时可取30毫微秒。如果是电容分压器，L的绝对值不大，但它对变换特性起着突出作用，其大小决定于电容器的结构，作为下限取1微亨/米，此值相当于单根伸直导线的电感。

C_p'假定是无电感的纯电容与单元并联，此电容对整个分压器来说约为(0.1—1)微法。

如上建立的等值回路可以用来模拟各种形式的分压器，我们重点阐明阻尼分压器的变换特性，不仅考虑冲击电压作用也考虑正弦电压作用下的结果。

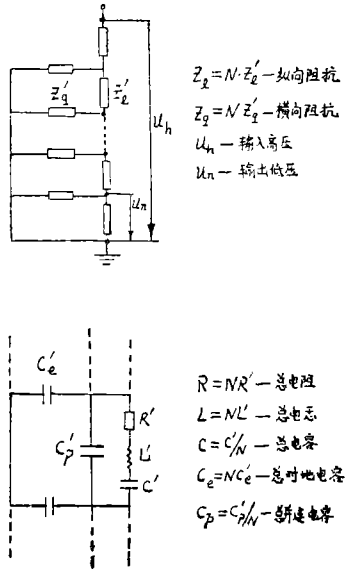

图6　阻尼电容分压器的等值回路

1.脉冲电压变换特性

分压器的脉冲变换特性用方波响应来表示，由文献[16]知之是

$$G(t)=\frac{u_n(t)\cdot N}{u_0\cdot n}=1-\frac{C_e}{6(C+C_p)}+2e^{-at}\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\frac{\cosh(bt)+\frac{a}{b}\sinh(bt)}{\left(1+\frac{C_p}{C}+\frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right)\left(1+\frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)} \tag{1}$$

式中　$a=\frac{R}{2L}$　　$b=\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\frac{1+\frac{C_p}{C}+\frac{C_e}{Ck^2\pi^2}}{\frac{LC_e}{k^2\pi^2}\left(1+\frac{C_pk^2\pi^2}{C_e}\right)}}$

得出上式时认为$C_p\ll C$；$C_e\ll C$；$n\ll N$，这对所有实体分压器都能满足。可以看出对上式进行数值上的讨论是不可能的，只有依靠电子计算机分别对各个因素作系统的计算后，进行分析和讨论。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用图7的具体例子可说明：当R很小，类似纯电容分压器而出现了振荡，随着R的增加从图上可见振荡减轻，R在250欧时振荡大到不允许程度，R在(750—1000)欧之间振荡明显，1000欧时上升时间约8.5毫微秒，短时过冲为10%，R最大到2000欧时振荡消失，因此，可知电阻存在一个最佳值。从（1）式产生过渡过程的双曲函数着手，保持b是实值，则

$$R > 2k\pi\sqrt{\frac{L}{C_e}}\sqrt{\frac{1+\frac{C_p}{C}+\frac{C_e}{k^2\pi^2C}}{1+C_pk^2\pi^2/C_e}} \tag{2}$$

经常$C_p \ll C$，$C_e \ll k^2\pi^2C$ 则上式

$$R > 2k\pi\sqrt{\frac{L}{C_e}}\ \frac{1}{\sqrt{1+C_pk^2\pi^2/C_e}} \tag{3}$$

当$k=1$时，求出的R为完全阻尼所需的电阻值，这就是串联电阻的电容分压器的理论依据。可以说它是带有L和C_e的纯电容分压器，而用合适的R将自身振荡阻尼掉。尽量减小L阻尼电阻R也相应减小，这样上升时间变小改善了响应特性，所以在阻尼分压器中L不可忽略，但还是应该尽量做小。另方面，电压波在分压器中的波行时间$C=\sqrt{LC_e}$，高2.5米的分压器以光速前进的电磁波通过所需的时间是恒定的，约10毫微秒。因而当L减小到极限值约1微亨/米时，再调整分压器使C_e减小就不起作用了。

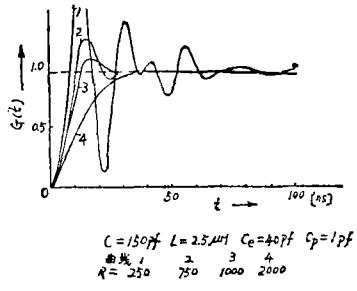

图7　不同R值的响应曲线

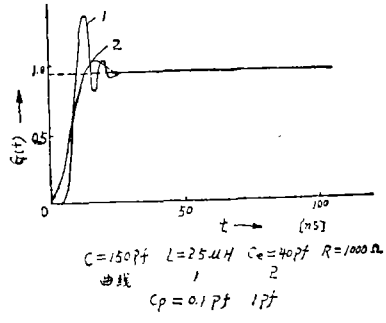

图8　不同C_p值的响应曲线

上面讨论了L、C_e、R对响应特性的影响。图8说明C_p的作用。当自1微微法减小到0.1微微法时，曲线1的起点滞后了，它明显地表现出波行时间的存在和大小。大的并联电容不仅阻尼了振荡，它将延缓响应的上升陡度，恶化分压器的转换特性。

2.频率变换特性

按电讯传输方程，高压端输入正弦电压u_h，在低压端输出的电压u_n，二者间的关系是：

$$\frac{u_n}{u_h}=\frac{\sinh\frac{n}{N}\sqrt{Z_e/Z_g}}{\sinh\sqrt{Z_e/Z_g}} \tag{4}$$

Z_e和Z_g从等值回路导出，对阻尼分压器来说可得

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{u_n}{u_h}=\frac{\sinh\frac{n}{N}g}{\sinh g}\quad 而\ g=\sqrt{\frac{(R+j\omega L)j\omega C_e+\frac{C_e}{C}}{1+\frac{C_p}{C}(R+j\omega L)j\omega C_p}} \tag{4a}$$

在阻尼分压器中这里的R值很小和电阻分压器的R有本质上区别，它在这里仅起阻尼作用。类似图7的方法，以不同阻尼电阻值和将C、Cp、Ce和L值代入(4a)计算后得图9。在小阻值(250—500)欧时，高谐振出现在大于10兆赫范围，提高R到1000欧时谐振消失，在20—30兆赫时响应特性下降了，此时频带宽约45兆赫。这里电阻用的是薄膜电阻L＝2.5微亨。考虑到功率时常用金属丝并绕，L变大接近10微亨。图10表示出此时振荡区间前移了，谐振消失时R为2000欧，带宽降低约一半，因为波行时间$\sqrt{LC_e}$加倍了。

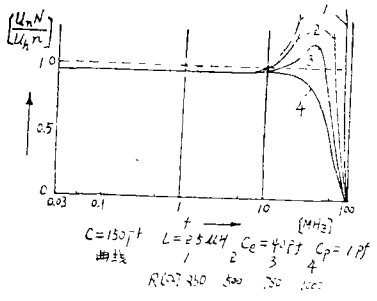

图9　不同R值时的频率变换特性

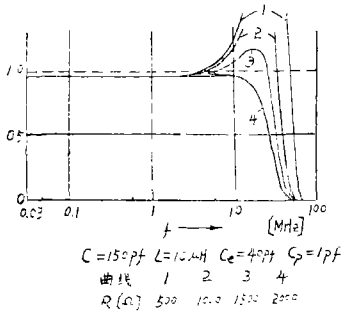

图10　不同R值时的频率变换特性

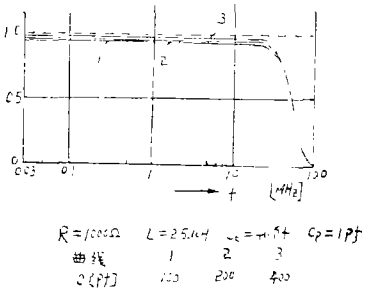

图11　不同C值时的频率变换特性

从图9和图10可以得到一个重要的结论，即阻尼分压器的波阻抗和电阻值之间存在一个最佳关系：

$$R=4\sqrt{\frac{L}{C_e}}$$

这是我们设计阻尼分压器的一个基本数据，由这一条件决定的称最佳阻尼分压器。

大量的计算说明：对阻尼分压器来说，C的大小对分压器的变换特性无影响，图11极好地说明了这一点。可见C仅是一个确定分压比的辅助元件。

为了便于理解，假设C_e和L的作用可忽略，则总输入阻抗为$R+\frac{1}{j\omega C}$，在高频时仅

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

R起作用，低频时却是高阻的，因此阻尼分压器是一架既可用在测量工频又可用以测量各种脉冲电压（截波，雷电波，操作波等）的分压器。

三、最佳阻尼分压器与低阻尼分压器的区别

上述最佳阻尼条件是单独分析分压器本身的特性求得。在实际使用时不可避免要有引线，它与分压器的波阻抗如不匹配，产生反射使响应畸变，如图12(a)[18]过冲很大，Zeangl又对引线的作用进行了深入的研究[19]。他把引线和分压器放在一起考虑，取链状等值回路，利用四端网络理论和拉普拉斯变换求出响应曲线方程。同前面一样，以符合实际情况的数值代入各参数，然后改变某一参数靠计算机进行大量计算，结果发现在引线入口处放置电阻值接近引线波阻抗的阻尼电阻可以消除振荡，见图13。图12(b)是实测结果。因此要有良好的方波响应，必须从整个测量回路来考虑。

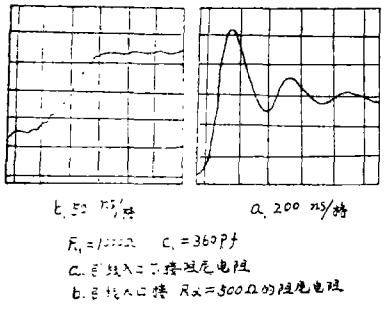

图12　四百万伏最佳阻尼电容分压器的单位方波响应曲线（实测）

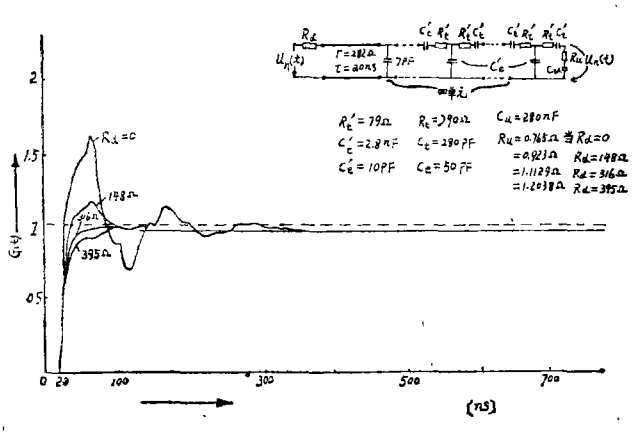

图13　带引线的阻尼分压器的链状等值回路的响应曲线（计算）

低压臂的参数也是不应忽视的。Zaengl同时给出Ru的近似条件为：

$$R_u C_u = (R_1 + R_d)C_1 + \frac{R_d/R_1}{1+R_d/R_1}\left[R_d C_p + \left(\frac{R_1}{r} - \frac{r}{R_d}\right)\right]$$

由这样全面考虑后选用的参数得出的响应幅值其误差在3％以内。

但是实用中试品电容往往比 C_1小，当最佳阻尼分压器并联在试品上时因其时间常数 $T=R_1C_1$太大而畸变波形。另外在引线入口处接 R_d 也不方便。为此Feser[20]认为应放弃R的最佳配合，降低R使分压器本身有合适的阻抗与引线匹配，这样既保持整个测试系统不出现振荡，又达到了减小分压器时间常数的目的，没有 R_d 操作也方便了。他提出高压边仍用电阻和电容串联，而低压边仅有电容的低阻尼分压器，见图14，高压边的总电阻取

$$R \approx (0.25-1.5)\sqrt{\frac{L}{C}}$$

其中L是整个测试回路的总电感，C为分压器的总电容。通常引线的波阻抗r约为300欧，而

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分压器的阻抗 $r_1=\sqrt{\frac{L_1}{C_e}}$（$L_1$为高压边电感，$C_e$为总的传地电容）约为200欧。R的值在百万伏以上约为（50—30）欧，并应保证使R_1C_1不大于150毫微秒。因为R采用了比最佳值低的数值，根据图7的规律可知上升时间将减小，有利于测量陡波，但也出现了过冲，因此要选用合适的R。为削弱过冲也可在低压臂接入一低阻电阻。

综上所述，当负荷电容大时，用最佳阻尼分压器来测量标准波形的试验电压是合适的，如用作测量陡冲击电压（截波试验）则应考虑引线的作用，从整个试验回路的布置统一考虑。低阻尼电容分压器可用作负荷电容，将高压部份的$R_1\approx r$和增加一个低压电阻后可用来测量所有类型的试验电压，即雷电冲击电压、操作冲击电压、交流电压和冲击截波电压。

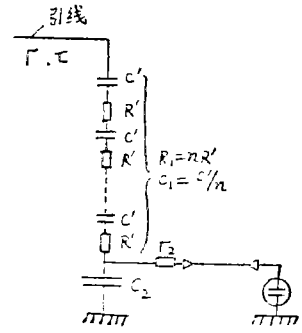

图14 电阻分布在高压边的阻尼分压器的原理图

四、通用分压器的出现

随着直流输电系统的发展，各国均积极开展闪络试验，进行这种试验时常将各种异常电压迭加在系统的直流电压上。因此，进行这类试验要求有一种可用于测量从雷电冲击电压直至直流电压的新型分压器。为此瑞士Habely和日本电气工程师协会均完成了研制工作，今介绍日本的情况如下[21]。

在原分压器上并联了一个高电阻。一百万伏分压器高2.5米分12级每级并100兆欧共为1200兆欧。问题是测陡波时各单元上电位分布不均匀，头几个单元在一段时间内忍受电压很高。为解决这个问题，日本人采用在每个单元上增装一套屏蔽电极的办法，见图15。对此进行了雷电冲击、交流电压和直流电压的验证试验，证明性能良好，其提供的参数是：

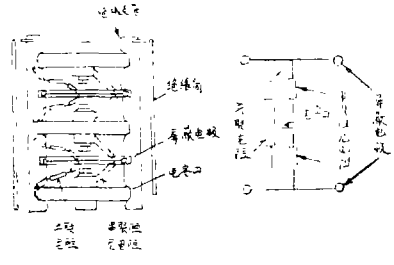
图15 高压臂单个元件组的原理图和结构图

1．最大工作电压如下：

雷电冲击：±1000千伏

操作冲击：±700千伏

交流电压：350千伏（有效）

直流电压：±500千伏

2．分压器的响应时间约为10毫微秒

3．精确度约为1％

4．在（0—40）℃之间变比变动在2％以内

参 考 文 献

[1] W.Rogowski等 阴极示波器的电压分布 AFE 1930 P 579 P 667

[2] P.L.Bellaschi 脉冲高压的测量 T.AIEE 1933 P 544

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

〔3〕 J.H.Hagenguth 间隙的短时火花击穿 El.Engineering 1937 P 67
〔4〕 R.Alsner AfE 1939 P 23
O.Zinke 阻容分压器的频率特性 ETZ-A 1939 P 927
〔5〕 S.B.Griscom等 测量输电线上脉冲电压的分压器 T.AIEE PAS 1954 P 228
〔6〕 R.F.Goossens和P.G.Provocst 用K.O纪录脉冲高压的误差根源 Bull SEV 1946 P 175
〔7〕 F.A.Fisher 冲击电压的瞬时响应 T.AIEE Com.S Electronics 1958 P 411
〔8〕 H.Baaty等 用方波校核脉冲测量回路 ETZ-A 1958 P 553
〔9〕 C.Gary RGE 1960 P 517
〔10〕 G.Hostopan 伞状屏蔽的分压器 Elektrie 1963 P 310
〔11〕 C.J.Miller 1958 P 262 T.AIEE Com.S Electronics
〔12〕 J.H.Park等 瓷绝缘子串的陡波试验 T.AIEE PAS 1953 P 737
〔13〕 A.F.Rohlfo等 电阻分压器的陡波响应 T.AIEE Com.S Electronics 1957 P 634
〔14〕 F.C.Creed等 短时作用冲击电压的测量 T.AIEE Com.S Electronics 1963 P.621
〔15〕 T.Harada 测量冲击电压的高质量分压器的发展 清华大学"高压冲击分压器"（二）
〔16〕 W.Zaengl 冲击分压器变换特性的计算 Bull SEV 1964 P.1249
〔17〕 W.Zaengl 测陡脉冲电压的分压器 Bull SEV 1965 P 232
〔18〕 K.Feser 几百万伏阻尼电容分压器的瞬态特性 TIEEE PAS 1974 P 116 中译文〔15〕
〔19〕 W.Zaengl 带引线的冲击分压器 Bull SEV 1970 P 1003
〔20〕 K.Feser 用于检测量特高冲击电压和交流电压的新型分压器 Bull SEV 1971 P 924
〔21〕 T.Harada 通用高压分压器的发展 TIEEE PAS 1976 P 595 （已有中译文）

◁小资料▷ 日本弟子屈地区输电线结冰防止方法

一、目 的：弟子屈地区66千伏输电线架设在海拔700米—800米的山地，从11月中旬到来年5月初经常处于结冰状态。由于环境恶劣，常引起导线断线事故 。为此 ，于1973年11月，在现场设立了一个观测点，共花费了5年时间对结冰时的特定气象条件、防止结冰事故的方法和效果进行了观测研究。

二、发生结冰时的气象条件： 据观测结果表明，发生结冰时的气象条件如下：

①在钏路市以北约70公里处的山岳地带，冬季时，当低气压从这一地带的背后"西北方向"通过时，和从太平洋吹来的湿润空气相遇，导线便结冰。

②结冰的形式，有雾冰、粗冰和雨冰三个类型。这里最多的是粗冰，但在3月份以后，经常发生雨冰。

③结冰大都发生在海拔超过750米的地域，此外，结冰量随着离地面的高度而增多。

④结冰的发展速度比积雪慢，导线结冰或积雪若时间很短的话，即使荷重很大，一般也不会导致事故。但多数情况下，结冰的时间是很长的，有的在一周内结冰可达10公斤/米。

三、结冰事故的防止方法：为了防止导线结冰而造成的事故，采取了以下措施：

①在导线间加装绝缘隔离棒，可以有效地防止事故发生。

②使用积雪探测及现场、气温、风速的遥测装置控制的融冰回路，效果较好。

③将聚四氯乙烯绝缘带缠在导线上，减轻导线和冰的附着力，并采用防止导线扭转的阻尼器来提高导线的扭转刚性。由于冰的自重，使附着在绝缘带上面的结冰脱落，这一方法很适合于粗冰。

自1977年3月采用以上措施以来，再没有发生因结冰而引起的事故。

（邱为平摘自日本《电气评论》80.1）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net