

# 混合线路上采用高频保护通道的技术分析

——记上海地区220kV混合线路高频保护开通成功

华东电力设计院 戴勤

**摘要** 220kV混合线路目前国内成功投产的高频保护的的经验甚少。本次上海地区获得了开通220kV混合线路的高频保护，为今后国内混合线路采用高频保护积累了成功的例子。本文介绍了高频保护的各种高频通道方案的比较，分析了各种高频通道的衰耗，同时也叙述了采用导引通道的过电压问题以及采取的各种措施的比较。

## 1 绪言

电力建设的发展，在未出现更高的电压级电网时，现有高压网络的结构势必日趋复杂。城市工业的发展，高压线路环城修建，出线走廊受到机场、建筑物、河流等的限制，无法全线采用架空线路，势必会部份地采用电缆供电，因此高压网络电缆架空的混合线路逐渐在各电力系统中出现。

高压线路的运行，为了满足系统稳定、线路潮流大、联络阻抗小的特性需要，线路继电保护装置均需利用传输通道构成全线速断的功能，最简便、可靠性高的传输通道便是利用输电线传输高频信号的电力线载波通道。可是电力载波在混合线路上运用受到载波特性阻抗不匹配的限制，目前国内成功投产的高频保护的开通经验甚少。

上海地区扬厂扩建220kV升压站，需建设两条220kV电缆架空的混合线路，扬厂委托华东电力设计院进行设计，提出了方案，进行了分析调查。在浙江省电力试验研究所的努力下，进行了试验及论证，提出了通道的系统参数，并组织了通道的系统调试投产。在工作期间，得到了华东电管局上海电力局等单位的重视，基建、调度部门的支持，终于在1992年7月投入华东电网运行。

混合线路上高频保护的开通成功为今后改革开放，形成城市环网，工矿网络密集型的结构中混合线路的采用，开拓了经济、可靠又简便的继电保护方案的选择。

## 2 混合线路的形成及今后的趋向

城市及工矿地区电网的建设，随着改革开放步伐的加快，国内工业生产日益发展，地区居民用电也日益增长，地区负荷密度成倍增长，如再采用低压配电网络来供电已很不适应，在负荷密集点采用35kV供电，大量的线路及配电站，势必增加投资及建设的工作量，特别为在城市的“寸金之地”，拓宽供电走廊与城市工业建设争土地，更是无法容忍的。所以如上海地区便采用220kV高压输电线路进入负荷区，限于负荷区的居民集中，工业设备密集，在进入负荷区时势必要采用电力电缆转入地下连接，这样就构成了电缆—架空混合线路。再者即使可以采用架空高压输电方式，但是跨越河流或日后发展如机场等迫使送电线路让道而转入地下，改用电力电缆输送时，又形成了电缆—架空混合线路。

因此，虽然从工业布局设计而言，供电方案总是避免采用混合线路，然而在城市发展、工矿扩建与供电方案有矛盾时，看来出现混合线路是不可避免的，特别对大城市环网而言，迟

早总会出现的。也可以从目前上海、广州、北京等大城市来看，混合线路已有一定数量。

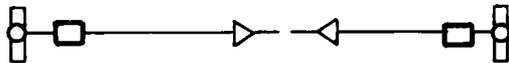
至于混合线路的结构，当然有不同的构成方案，但不外乎如图1结线：



(a) 电厂出线侧有电缆引出



(b) 受电端需电缆引入



(c) 输电线路中段有电缆引出

图 1

图 a 所示，一般由于电厂受布置、地形、出线走廊等限制而形成。

图 b 所示，一般较为普遍，进入城市或工矿负荷密集区，架空线路被迫转入地下。

图 c 所示，一般受地形、建筑物、或航道、航空等限制。

总之，即使如上所示结线，一般电缆长度均不会太长，从目前国内看来，最长约为3km左右，一般均在几百公尺左右。

因此，针对上述的结线，对混合线路的继电保护进行研究，

找出最经济、最合理及更可靠的方案是很有意义的，为今后新的建设提供了成熟的经验及设计依据。

### 3 混合线路采用高频保护的困难性

高频保护是将其发出的高频信号载附在电力线路（包括电力电缆及架空线路）上，传输到对侧的高频保护装置，进行逻辑比较，判断故障。

电缆架空混合线路上开设载波保护，决定于电缆的高频衰耗及电缆架空线由于高频特性阻抗不匹配而造成的失配衰耗。

电缆架空混合线路开载波通道，八十年代曾在广东电力系统试用过，后来据说系统情况的变化，还是在架空回路内传输高频信号，不过广东电力系统为此做过大量的研究及试验，取得了不少宝贵的经验，为以后的工作借鉴不少。从广东及上海的实测数据和分析，电力电缆与架空线的波阻抗相差约15倍，前者约为25欧，后者约为400欧，电力电缆与架空线直接连接，高频信号在接头处的失配衰耗较大，上海实测数据为0.7~1奈，电力电缆的公里衰耗值也较大，直埋单芯电力电缆的衰耗上海实测数据约为架空线的十几倍，广东实测数据甚至达数十倍之差。

电力电缆中传输高频信号，其信号的衰耗将随着频率的升高增加很快，要在220kV电缆内传输高频信号，一般认为也只能使用在80kHz以下。

220kV电力电缆都是单相式的结构，安装均为平行敷设，因此在电力电缆的金属护层上，正常均会感应出电压，电力电缆较长时，则感应过电压可能超过人身安全的规定，一般为了安全起见，均将金属护层接地，如果两端接地，又将产生很大环流，导致护层发热，反之又影响了电力电缆的输送容量。因此当电力电缆长度过长时，为了避免影响人身安全，故障时避免护层感应过电压超过其护层允许的耐压水平，一般运行单位均将电缆护层以全长分成3N段，每三段为一周期，每周期护层交叉换位，两端接地处理。这样的处理，将大大不利于高频信号的传输，增加很大的衰耗，据有经验专家的估计，换位二次以上，衰耗已大到不能容忍

的地步。因此，较长的电力电缆载附高频信号的传输方式，看来是不可取的。势必要采用导引线传输通道来传递高频信号。

采用导引线传输通道也存在通道衰耗及感应过电压的问题，但是这些问题均可从选型上来解决。

高频信号从电力电缆经架空线传输至对侧，由于电缆（或导引线）与架空线的特性阻抗不同而产生失配衰耗很大。为了减少高频通道的失配衰耗，需要采用特殊制造的结合滤波器。

由于电力电缆的特性阻抗较小，就要求放大耦合电容器的容量，以避免结合滤波器的通频带过于狭窄，影响高频保护使用的特性。

混合线路采用高频保护存在有上述困难，所以运行中很少采用。但是在上海地区由于出现了数十公里的混合线路，限于各种原因，又无法采用其他有效的保护装置，因此按照华东电力设计院提出方案，由浙江电力试验研究所进行了长期深入研究及试验，提出了不少可行性的方案。计有：

- (1) 电力电缆传送高频信号方式
- (2) 高频电缆加屏蔽层传送高频信号方式
- (3) 10kV 电缆传送高频信号方式
- (4) DYY32—P 型电缆传送高频信号方式

经过方案比较，浙江电力试验研究所推荐采用 DYY32—P 型电缆方案。参阅浙江所的有关试验资料、学术论文以及我院的工程设计资料，现将其分析结论简列如下各节。

#### 4 混合线路采用高频通道的衰耗分析

根据上述的方案，结合国内，特别是广东的经验，分析如下：

- (1) 电力电缆的高频特性阻抗：

高频信号在传输线内进行传输时表现的阻抗，随频率不同，线路结构不同而不同。一定的高频频率在不同的线路结构上传输时，表现有不同的阻抗，如果传输线的结构均匀，可以由单一的计算公式予以计算而确定，一般均材参数，电缆约为25欧左右，而架空线约400欧左右。

然而，国内目前电力电缆均制成单相电缆型式，三根三相电缆在沟内呈水平排列敷设。同沟还有油系统的控制信号电缆或者传输高频信号的导引线电缆。为了降低其感应电压又不降低其输送容量，一般均将电力电缆的护层分段交叉换位接地，全长分成 $3N$ 段，每三段为一个周期，一般均在600公尺左右为一段。其护层换位如图2所示：

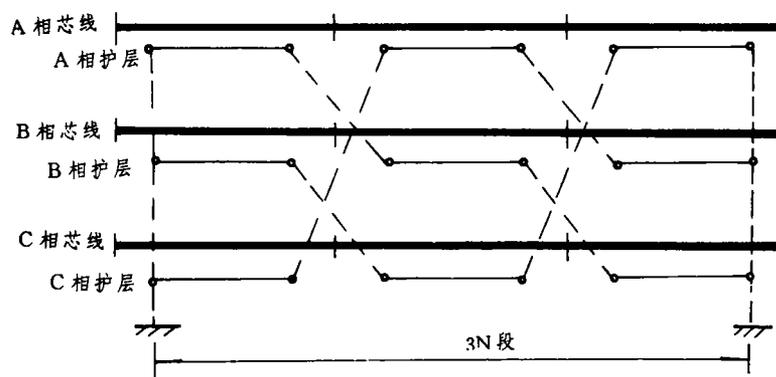


图 2 电力电缆芯线及护层换位连接示意图

因此,当高频信号耦合在 A 相,在第一段内高频信号传输在 A 相电缆内,设其波阻抗为 25 欧左右,但当进入第二段,信号则与 B 相护层耦合,进入了远大于 25 欧阻抗内传输。顺次,当进入第二周期时,则信号又从较高的波阻抗进入到较小的波阻抗的 A 相内传输,信号在进入不同阻抗面时产生了不匹配的衰耗,显见,周期 N 愈大,阻抗不匹配引起的衰耗也将更大。因此在 600 公尺左右不换位的水泥线路,高频通道具有较好的特性,如果电缆长度需经二次以上换位时,即使在同一根电缆内传输,由于换位而产生的衰耗值已大到不能容忍的地步。

对护层换位的电力电缆上传输高频信号,亦随着频率不同而呈现不同的特性阻抗,根据广东测试数据看来,电缆特性阻抗随着频率的变化近似正弦规律而变化,据云周期约为 25kHz。

按照广东实测线路两相高频衰耗其值如下:

A 相地平均高频特性阻抗约为 25 欧, B 相地平均高频特性阻抗约为 23 欧。

#### (2) 电力电缆的高频衰耗特征

从广东实测及计算值之不同,看来衰耗值有很大差别,例如按单一结构的电缆衰耗计算值为 0.22 (奈),而实测 A 相平均达 1.1 (奈), B 相平均达 1.0 (奈)。其原因认为由于电缆护层换位,特性阻抗不匹配而造成衰耗值增加,测试中亦发现衰耗值亦是随频率而波动。

#### (3) 混合线路的高频特性阻抗不匹配的反射衰耗

根据浙江电力试验研究所的分析:如果按照电缆的高频特征阻抗为 20 欧,架空线路为 400 欧计算,如果不采取任何措施,高频信号在传输到不同的介质面时,产生的反射衰耗计算为 0.7 (奈),如果仅考虑为一次反射,至少衰耗在 1.5 (奈) 以上。而实际上通道中均为多次反射,因此情况比此更为严重,实测也说明了这种情况。

#### (4) 混合线路的高频特性及目前的措施

按照上述分析,由于混合线路是一个不对称的四端网络,故其两侧的特性阻抗不同,而且随频率及电缆结构不一而有很大变化及波动。衰耗特性也有如此的波动。而且其变化实测要比计算严重得多。由于衰耗值的增加,特性阻抗的波动,在很大程度上影响混合线路使用高频保护的成功率。

按照上节所述,我们在上海地区的混合线路上提出了各种高频通道的方案,经过论证,浙江电力试验研究所推荐采用导引线作通道代替电力电缆传输高频信号的方案。

考虑到导引线电缆与架空线的高频特性阻抗也不同,在上海电网中一般均考虑设置高频桥路予以匹配。桥路中设置的结合滤波器必须特殊设计及制造,这次我们按导引线采用 DYV—32 型导引线电缆,其特性阻抗为 143 欧,因此电缆型结合全滤波器的参数采用 143/75 规格,考虑了下述过电压的要求,采用高耐压结构,由北京电力设备总厂研制。

原理接线见 6 节所述。

## 5 混合线路采用导引线通道的过电压分析:

导引线通道的过电压,一般有二种原因造成:一为感应过电压,另一为地电位升高。现分别叙述如下:

#### (1) 感应过电压的影响:

如前节所述,由于电力电缆均为单相式,水平埋地排列,导引线也一般均与电力电缆同沟近距敷设(两者相差约 0.25 米)。当电力电缆流过接地短路电流时,由于电磁耦合在其周围的导引线电缆的线芯及护层产生纵向感应电压,按文献<sup>(2)</sup>,其感应过电压值可近似按下式计

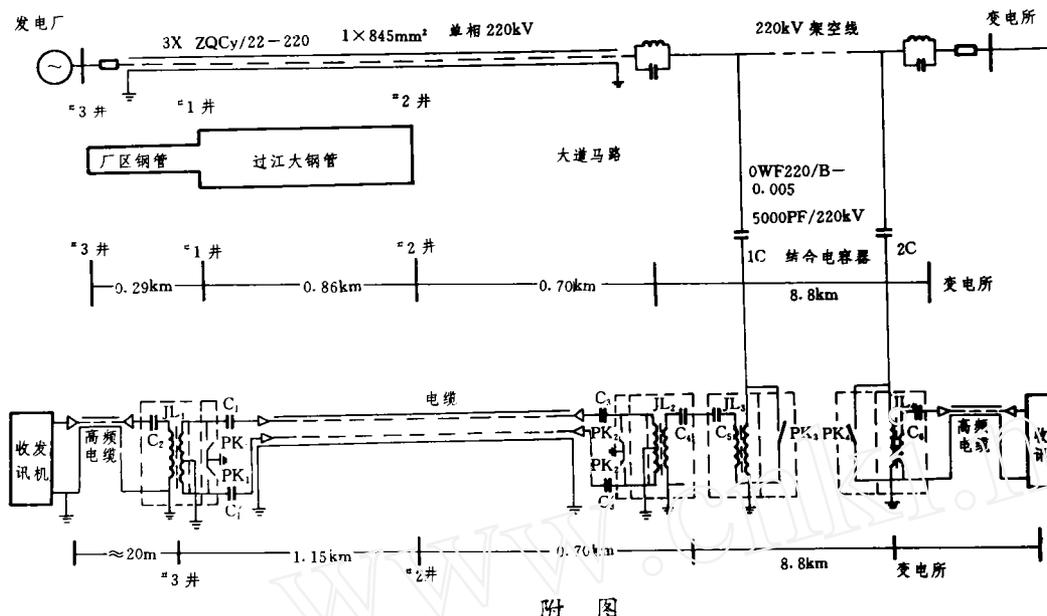
算：

$$E=W(\omega M)(I)L$$

式中：E——感应过电压 (V)，W——综合屏蔽系数， $\omega M$ —— $\omega$ 角频率，  
M 互感抗 (h/km)

I——短路电流 (A)，L——导引电缆与电力电缆平行总长度 (km)

上述文献中计算了当  $I=20\text{kA}$ ， $W=0.4$  时，感应电压约为  $5688\text{V}$ 。



附图

从上式可见，要使感应过电压下降，最有效的办法是降低屏蔽系数的数值。如架空地线可以有效降低其数值，相应高压电力电缆的金属屏蔽层下降的效果更大。如根据文献<sup>(2)</sup>中所述为例：

架空地线：其直流电阻（并联值） $<1.0\Omega/\text{km}$  时，屏蔽系数为  $0.8\sim 0.9$ 。

270kV 电力电缆：屏蔽系数为  $0.1\sim 0.25$ （铅护套）及  $0.04\sim 0.1$ （铅护套）。

由上可见，无论如何，电力电缆的护层可靠接地是降低感应过电压的最有效办法。

高频电缆本身无任何屏蔽措施，为了减少高频电缆上的纵向感应电压，可以外敷屏蔽层或有其本身绝缘介值来抵抗过电压。上海地区最后是采用高耐压的导引线电缆（DYV-32型），耐压为  $15\text{kV}$ 。

### (2) 地电位升高的影响：

线路发生接地故障时，电厂或变电所送出短路电流，由故障点流向大地，经电厂或变电站的接地网返回电源。接地网有一定数值的接地电阻。因此使电厂或变电所的接地网的地电位升高。当敷设有外引导引通道线的电厂或变电所，由于导引线经分布电容与远方地——真正的零电位相连，因此导引线通道电缆线芯及护层对电厂或变电所承受着其接地电压升高的过电压。如根据上海地区运行单位80年代估算：按220kV西部变电所为例，最大接地短路电流按  $17.06\text{kA}$ ，西郊站实测接地电阻为  $0.18\Omega$  时，地电位升高估计值约为  $3.07\text{kV}$ 。

因此，为了防止地电位的升高而损坏设备及造成人身安全事故，看来导引线电缆要求耐高压的电缆引入使用。引入需作高压设备处理。

### (3) 注意的问题及具体的要求：

当混合线路的电缆被采用导引线电缆作高频通道时，尚须注意下列问题及具体的要求。

I) 为减少电磁感应过电压和地电位升高，要求电力电缆的护层全线可靠接地，使接地短路电流大部分从电力电缆护层返回电源。

II) 导引线电缆要采用对绞芯线，防止产生横向电压而使保护误动。

III) 为了防止地电位升高，至少在离开电厂或变电站100米处需用耐高压的导引线电缆引入，此电缆的芯线及护层对外能承受可能的地电位。

IV) 导引线电缆金属护层不应人为接地，电缆备用芯亦不能接地，尤其是引入电厂的护层不应接地，以防止护层流过大电流而烧坏，影响电缆使用寿命。

## 6 上海地区220kV 混合线路所用高频保护通道介绍

上海地区今年投产的两条220kV 电缆架空混合线路都是由扬厂至扬高变电所。扬厂通过1.15km 过江隧道及0.7km 直埋的电力电缆连接至8.8km 的架空线路送至扬高变。

每回线路上均设置两组高频闭锁距离保护，距离保护各为微机型及D型，通道分别在A、B相耦合。

为了减小感应过电压及护层发热，电力电缆护层是按照交叉换位连接的。

为了有效通过高频信号，利用导引线电缆来传输，经电缆架空线连接点桥路匹配，由架空线传输至对侧。同时在电缆架空线连接点设置阻波器。其连接示意图见附图。参阅文献<sup>(1)及(2)</sup>所述。现将有关主要考虑问题叙述如下：

(1) 根据浙江电力试验研究所的计算及分析，工程按上述三种方案进行了技术经济比较，现将其汇总简述如下：

序号	通道方案	1	2	3
1	设置及选型	1.85km SYV—75 高频电缆及4" 自来水管屏蔽	1.85km 10kV 交联聚乙烯电缆	1.85km BICC (英) 导引电缆 (相当于上缆厂 DYY—32P 型)
2	投资总额	6.7万元 *	7.955万元 *	7.4~9.25万元 **
3	总衰耗	1.47~1.54N *	1.84~1.94N *	1.70~1.81N *
4	通道裕度	2.53~2.46N *	2.16~2.06N *	2.15~2.03N *

\* — 根据文献<sup>(2)</sup>摘录。\* \* — 按厂家估算。

从上述三种方案比较，有关总投资，总衰耗等按单回线比较，其指标均相差不多，但从施工方便及今后发展，特别是双回线的结构看来，BICC (英) 制、(相当于上缆厂 DYY—32P 型) 方案优越于其他方案。

因此最终选定 DYY—32P 型电缆，按每回线路配置一根导引线电缆考虑。

(2) 按审定的设计方案，每回线路均设置两套高频闭锁距离保护，各有两组高频通道联系。为了保证其可靠性，通道设计采用交叉连接方法：

导引线电缆编号及芯对	连接220kV 线路号及保护组别	通道频率及连接保护名称
1# 导引线	芯对1	2149# B 组保护 150kV 微机距离
	芯对2	2150# 线 A 组保护 130kC D 型距离
2# 导引线	芯对1	2149# 线 A 组保护 118kC D 型距离
	芯对2	2150# 线 B 组保护 150kC 微机距离