

继电保护高频通道

Г·В·米庫茨基著

馬国强译



中国工业出版社

继电保护高频通道

Г·В·米庫茨基著

馬国强译

中国工业出版社

本书介绍输电线上继电保护高频通道的装置和运行方面的资料，阐述了通道中主要元件的工作原理和技术特性，并对其运行情况作了分析。

本书可供从事继电保护高频通道的运行和设计人员参考。

Г.В.МИКУЦКИЙ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ
КАНАЛЫ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1959

* * *

继电保护高频通道

馬国强译

*

水利电力部办公厅图书编辑部編輯（北京阜外月坛南街10号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $8 \frac{11}{16}$ ·字数188,000

1962年9月北京第一版·1962年9月北京第一次印刷

印数0001—2,610·定价(10-6)1.15元

*

统一书号：15165·1225(水电-195)

序

由于战后年代里动力工业的迅速发展，联合电力系统功率的增大和高压输电綫距离的加长，在保証不间断供电方面起着重要作用的继电保护装置，就有了特殊的意义。大功率电力系统运行的稳定性，只有利用快速动作的高頻继电保护，才能得到保証；而高頻保护装置，則包括了輸电綫上的高頻通道。

在苏联，采用高頻继电保护已有25年以上的历史。拟制和运用高頻继电保护的首創者，是B.И. 伊凡諾夫和П.И. 雷若夫。他們在烏拉尔电力系统装設了第一套这样的继电保护装置。

1940年，在“紅霞”工厂里，工程师A.M. 克魯格略柯夫小組試制并生产出工业用的高頻保护收发訊机；但受卫国战争影响而未能成批生产。在全苏电力科学研究院（原电站部中央电工研究所）的参与下，继电保护高頻通道的设备又在长途电信工厂恢复了生产。在1948年，开始生产ПБЗ型高頻收发訊机、高頻阻波器用的調諧元件和連接滤波器。与此同时，开拓了本国的高頻继电保护装置制造工业，制造了ПЗ-161~165型和ДФЗ-2型高頻保护装置。不久以前，生产出КЗ-500型强流綫圈和СМ-70-0.0044型耦合电容器。

从1950年开始，在全苏电力科学研究院中，著者领导的小組試制了带有石英稳頻装置的ПБЗК型高頻收发訊机。H.Л. 雷巴柯夫指导了ПБЗК型收发訊机在工业中的运用。而生产ПБЗК型收发訊机来代替ПБЗ型收发訊机，則是1952

年在无线电业工厂开始的。

1954~1956年，由于400千伏远距离输电线的建造，输电线上高频通讯技术有了飞跃的发展。全苏电力科学研究所和生产部门一起，为这些输电线制造了整套特殊的高频设备；其中包括ИВЗ-400型高频收发讯机，其输出功率约为100瓦。

对于继电保护高频通道技术的发展，B.И.列奥诺夫与Г.Я.李昂（莫斯科电力系统）、M.Н.潘金（列宁格勒电力系统）、M.A.茹罗契柯（斯维尔德洛夫电力系统）、B.Φ.卡拉杰夫（顿巴斯电力系统）、B.M.莫捷列尼茨基（罗斯托夫电力系统）、H.И.克拉索维茨基与B.Γ.卡冈（400千伏输电线运行工作人员）及其他电力系统工作者，都起了很大的作用。

著者拟在本书中对继电保护高频通道的理论和一些技术问题或多或少地加以叙述；同时借此总结这些通道在电力系统运行中所积累的經驗。但限于篇幅，不可能包括与本技术领域有关的全部问题。在本书内容中，就没有包括继电保护高频通道设计中的某些问题，如：频率的选择，隔离设备的计算，设备的安装等等。上述问题的部分资料，读者可在“输电线高频通道的计算”一书（苏联国立动力出版社1957年出版）中找到。

近年来在通讯技术中，开始广泛采用半导体元件来代替设备中的电子管。晶体二极管和三极管在继电保护装置中的应用，是大有发展前途的，因为它们可以从根本上提高设备的可靠性，并使其运行简化。在高频收发讯机中以及在继电保护线路中应用半导体元件的创制工作，现在已有一些单位正在进行，其中有全苏电力科学研究所、火电设计院和科学院动力研究所。在全苏电力科学研究所里，1957~1958年间，

著者領導的小組試制了全部用晶体三极管的高頻保护收发訊机。这种收发訊机的試制品与 ДФЗ-2 型相差动高頻保护装置配在一起，已于1958年7月在莫斯科电力系统的一条輸电綫上投入了运行。但是用半导体元件构成的继电保护装置，目前尚未达到工业生产的阶段，因此在本书中就不加討論了。

本书主要供电力系統中从事通訊和继电保护运行人員閱讀，但是对設計单位的工作人員和工学院的学生，也是有益的。

讀者的希望和批評意見，請寄到莫斯科水閘河岸街10号国立动力出版社，著者对此表示欢迎，并致以感謝。

最后，著者对 И.С.斯維尼戈洛德斯基、Я.Л.貝霍夫斯基和 Г.И.李昂表示感謝，他們对本书的原稿提了宝贵的意見。

目 录

第一章 继电保护高频通道概述	9
1-1 高频通道的用途	9
1-2 继电保护高频通道的特点和結綫	13
1-3 高频能量的衰减	17
1-4 发送电平和接收电平	22
第二章 高频电流沿三相輸电綫的传输	24
2-1 高压綫路作为联络通道的特点	24
2-2 高频电流沿三相輸电綫傳輸的基本概念	25
2-3 輸电綫中高频电流衰减的計算法	28
2-4 綫路的一次参数	32
2-5 各序波的傳播方程式	37
2-6 各序波的公里衰减、波阻抗和傳播速度	39
2-7 終端衰减和輸入阻抗	45
2-8 高频通道衰减的算例	47
2-9 短綫路的衰减和輸入阻抗	51
2-10 被保护綫路短路时高频通道衰减的增加	56
2-11 在不良天气条件下高频通道衰减的增加	58
2-12 高频通道衰减的运行資料及經驗公式	60
第三章 高频阻波器和耦合电容器	67
3-1 高频阻波器的插入衰减	67
3-2 单頻阻波器	71
3-3 多頻阻波器	76
3-4 寬頻帶阻波器	79
3-5 阻波器調諧元件的过电压保护	85
3-6 耦合电容器	93

第四章	連接滤波器和高频电纜	100
4-1	連接滤波器的一般理論	100
4-2	变压器式和自耦变压器式滤波器的計算	107
4-3	滤波器輸入端和輸出端上电压、电流的关系	113
4-4	苏联生产的連接滤波器及其改进型	115
4-5	从耦合电容器抽取工頻电压用于自动重合閘	120
4-6	高频电纜	124
第五章	继电保护高频通道的运行特性	135
5-1	收訊机的灵敏度	135
5-2	收訊机的選擇性	140
5-3	收訊滤波器的通頻帶	143
5-4	发訊机的操作特性	148
5-5	高频通道的衰减	151
5-6	超越衰减时的裕度	154
5-7	发訊机的頻拍	157
5-8	高频通道的运行測量及故障檢查法	160
第六章	ПВ3K 型收发訊机	164
6-1	ПВ3K 型收发訊机的主要技术数据	164
6-2	石英諧振器的特性	166
6-3	ПВ3K 型收发訊机与滤过器式方向高频保护 配合运行时的原理电路图	171
6-4	ПВ3K 型收发訊机与相差动高频保护配合 运行时的原理电路图	184
6-5	ПВ3K 型收发訊机的特性	189
6-6	ПВ3K 型收发訊机的运行經驗	194
6-7	工作頻段的展寬	197
第七章	400千伏綫路上用的ПВ3-400型高频 收发訊机	199
7-1	ПВ3-400 型的用途和技术数据	199
7-2	ПВ3-400 型收发訊机的原理电路图	202

7-3	发訊机的輸出滤波器	210
7-4	ПБЗ-400 型收发訊机的运行特性	219
7-5	400千伏綫路继电保护高频通道的运行經驗	221
第八章	长綫路及有分支綫路上高频通道的运行特性	228
8-1	长綫路上高频通道的特点	228
8-2	高频和工频电流的传播時間对相差动保护 运行的影响	228
8-3	反射訊号的影响	233
8-4	接收訊号与反射訊号幅度的关系	238
8-5	反射系数的計算	241
8-6	有分支綫路上高频通道的工作特点	249
第九章	电干扰对继电保护高频通道运行的影响	255
9-1	輸电綫上干扰的类型和特性	255
9-2	分布干扰	260
9-3	耦合电容器和連接滤波器对綫路上电压冲击的反应	262
9-4	高频阻波器中过渡过程所引起的干扰	267
附录 1	电平換算表	271
附录 2	按公式 $b = \ln \frac{U_1}{U_2}$; $b = \ln \frac{I_1}{I_2}$; $b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}$ 計算的衰減表	273
附录 3	苏联一些綫路的继电保护高频通道的衰減 数据	275
参考文献		277

第一章 继电保护高频通道概述

1-1 高频通道的用途

继电保护装置是用来保证对电力负载不间断供电和提高电力系统稳定度的。电力系统是由许多电站组成的，这些电站彼此之间和跟负载之间是以高压输电网络联结起来的。各重要负载的电源，至少要用两回输电线路来供给，这是为了其中一回线路发生故障时不致中断供电。因而继电保护装置必须保证只切除输电网络中发生故障的那段线路，即继电保护装置在检出故障线段方面必须有选择性。对继电保护装置同时还要求快速动作，就是说，应该在尽可能短的时间内把故障线路与其余的电网隔离开来。故障切除时间较长时，个别电站就可能失去同步，更严重时，甚至可能破坏整个电力系统的运行。

输电线路的高频保护装置通常包括两组，分别安装在被保护线路的两端。

被保护线路上任何一点发生短路时，只有在装在該线路两端的两组保护装置同时动作的情况下，才可能在两端把故障线路瞬时地切除。换句话说，装在线路一端的保护装置，其动作应该不仅根据本端的情况，而且要根据线路对方的情况。而线路对方的情况，则是通过联络通道来传达的。

对短的线路(数公里)特别是架设在气候恶劣地区的线路，通常要采用专用的联络电缆(带控制导线的纵差动保护)；而长度为10~15公里的线路采用控制导线就不适宜了，不论从经济观点或是从联络通道可靠性的观点来看，都

是如此。因此数十或者数百公里的线路，就利用被保护输电线路上的高频通道作为两组保护装置之间的联络通道。高频保护系利用被保护线路作为高频通道的保护。

在苏联，有的继电保护装置是以高频通道作为在外部短路时传送闭锁信号用的。

在方向高频保护装置中，高频闭锁信号从工频功率由线路指向母线的线路一端发送，而在工频功率由母线指向线路的线路另一端接收，然后闭锁跳闸。当被保护线路上发生短路时，线路两端的功率都是由母线指向线路，此时不再发送闭锁信号，线路两侧继电保护就各自动作而断开线路。图 1-1 中所表示的是其中有一段线路发生短路的高压电网单线图。当短路发生在中间那段线路上时，该线路两端的功率都由母线指向线路。此时该线路的高频发讯机 3 和 4 都不工作，因而保护就在该线路两端动作切除。在第一段和第三段线路上，2 和 5 两处的功率由线路指向母线，故该两处的高频发讯机启动，分别闭锁了线路另一端的保护。

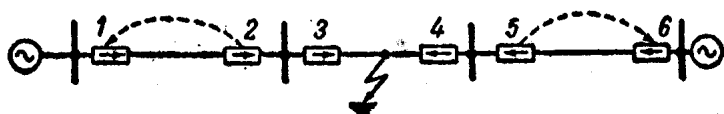


图 1-1 高频方向保护的作用原理

实线箭头—工频功率的指向；点线箭头—高频闭锁信号的指向。

因此，发生短路时仅切除发生故障的那一段线路。

高频闭锁方向保护有好几种型号〔文献1和2〕。苏联生产的用于110和220千伏线路的 II 3-164 型方向高频保护装置是由火电设计院研究出来的〔文献3〕。这种保护的特点，是采用了对称分量滤波器来动作保护的启动元件和功率方向元件，所以这种保护称为滤波器式方向高频保护。对于 400 千

伏綫路則制成了H3И-400和HΦ3-400两种型号的方向高频保护装置。第一种是火电設計院研究出来的，第二种是全苏电力科学研究院研究出来的〔文献4〕。这两种保护装置的基本差别，在于第一种中的功率方向元件是采用圓筒式感应型继电器，而第二种是用相敏綫路作为方向元件。相敏綫路輸出端直流电压的极性取决于綫路中的功率指向。該电压加在保护装置的继电器工作綫圈上和高频发訊机的启动电路上。当功率由母綫指向綫路时，相敏綫路輸出端的电压极性应使发訊机不致启动，并使流入继电器工作綫圈的电流方向为继电器的动作方向。继电器中除了有工作綫圈之外，还有一个由高频收訊机輸出端供电的制动綫圈。当接收到高频閉鎖訊号时，尽管工作綫圈中有电流流通，继电器也不动作。当功率由綫路指向母綫时，高频发訊机就被相敏綫路輸出端的电压启动，此时发訊机所发送的高频訊号，就閉鎖了綫路对端的保护。

全苏电力科学研究院研究出来的ДΦ3-2型相差动高频保护装置〔文献5〕，从1953年起即在苏联得到广泛的应用。这种保护是用比較被保护綫路两端工频电流的相位关系来动作的。綫路一端电流的相位，沿着高频通道傳輸到綫路对端，这时高频电流是以間断的訊号形式发送的；每个訊号的持續時間和訊号的間隔時間都等于半个工频周期。这种高频电流的控制方式，称为操作。为了要使一个高频通道能反映被保护綫路的三相情况，采用了把三相电流变换成单相电流的对称分量滤波器綜合装置。高频发訊机就是用这种电流滤波器輸出端的工频电流来操作的。

操作电压是这样进行操作的：在保护区外短路时，使綫路两端的发訊机在不同的半个工频周期內工作；在保护区內

短路时，使两端的发訊机在同一時間工作。

每一台收訊机都收到两个发訊机发的訊号。在保护区內短路时，收訊机收到的是間断的高頻訊号，此訊号經過变换以后作用到继电器的工作綫圈上，使綫路两端的保护各自动作而將綫路切除。

当发生穿越性短路时，綫路两端的发訊机将在不同時間工作，綫路本端发訊机訊号的間隙恰被綫路对端送来的訊号所填滿。此时，收訊机收到的是連續不断的高頻訊号，因而继电器工作綫圈中就没有电流通过。

相差动高頻保护的高頻通道，与方向高頻保护的通道一样，是属于高頻閉鎖通道这一类的。因为在本端发訊机停发的時間間隔內所收到的高頻訊号均是将保护閉鎖；当綫路对端沒有送来高頻訊号时，本端的保护就动作將綫路切除。

400 千伏綫路的相差动高頻保护已生产的有两种。其中 $\Delta\Phi 3-400M$ 型是用于干綫上，而 $\Delta\Phi 3-400K$ 則用于不太长的 400 千伏环状綫路。这两种型号的保护都是由全苏电力科学院研究出来的〔文献6〕。

保护装置可以不用高頻閉鎖訊号的原理而用跳閘訊号脉冲的原理来实现。在此情况下，通道是用来傳送跳閘訊号；此訊号系由发现被保护綫路上有短路現象的綫路一端继电保护的动作而发送到綫路的另一端。后者的保护装置在短路时可能根本未动作。

如果联络通道系由被保护輸电綫的导綫加工而成，則跳閘訊号就必須沿着故障綫路来傳輸。在此情况下，短路时高頻通道的衰减将会大大增加(參看第二章)。

外国的經驗是在受电变电站沒有高压开关的分支綫路上使用跳閘訊号脉冲的。当变压器发生故障时，就发送跳閘訊

号給送电变电站。为了更好地免除干扰的影响，跳閘訊号通常由两个或数个不同频率的脉冲組成。例如：跳閘訊号可以在同时有其他频率脉冲情况下，中断一个频率脉冲的方法来傳送。为了傳送这些訊号，就須用多通道的設備或特殊的单通道設備〔文献7〕。跳閘訊号的傳輸同时还被利用来加速第二段内距离保护的工作〔文献8〕。

在美国，进行了用无綫电中继綫路傳輸跳閘訊号的工作〔文献7和9〕。跳閘訊号系用多通道的无綫电中继綫路中的一个电话通道来傳送。此时，应預先对干扰和訊号衰落作专门的防护措施，以防止由于訊号的衰落而使訊号/干扰比小于允許值时所引起的跳閘誤閉鎖。为了保证跳閘訊号傳送的可靠，还应規定裝置的高频部分以及供电电源有全套的备用設備。

1-2 继电保护高频通道的特点和結綫

高频訊号沿高压綫路的傳輸是与綫路中工频电流的傳輸同时进行的。因此，要通过分离高频和工频电流的特殊設備，使由綫路送出或接收高频能量。

高频通道可以用数种方法来构成。当高频收发訊机接在綫路的两根导綫上时，构成了相-相通道。此时，輸电綫犹如两綫通信綫路。当高频发訊机接在一根导綫与大地之間时，就构成了相-地通道，即相当于单导綫通信綫路。图1-2示出这种傳輸方式的結綫。有时还采用其他联結方式，例如：相-两相、不同綫路的相-地、等等。三相-地联結方式則因高频能量損耗很大，故未予采用。

用相-地的方式来傳輸，其效果比相-相的方式差些。但是用这种傳輸方式首先由于其所需要的設備数量最少，其次是能使一条高压輸电綫上安排数目較多的通道。因此，在苏

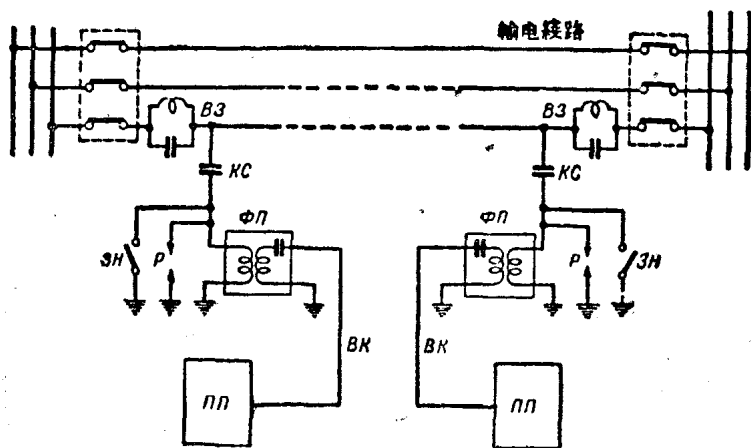


图 1-2 相-地結綫的保护高频通道原理結綫图

联广泛采用相-地結綫方式。

图 1-2 結綫的继电保护高频通道中，包括高频收发訊机 $\Pi\Pi$ ，高频電纜 $БК$ ，連接滤波器 $\Phi\Pi$ ，耦合电容器 $КС$ ，高频阻波器 $ВЗ$ 以及輸电綫的导綫。

高频收发訊机用来发送和接收高频訊号。由于在大多数继电保护的情况下，允許收訊机按其本身发訊机的頻率工作，故发訊机和收訊机都調諧于同一頻率。至于別种用途的高频通道(通訊、远动等等)，一般都以两种不同頻率工作，因为这些设备的收訊机不應該反应其本身发訊机的工作情况。

高频電纜是用来連接高频收发訊机和那些接到高压綫路上去的设备的。高频收发訊机一般都安装在变电站的继电保护盘上，距被保护綫路有相当的距离。过去曾把高频收发訊机装在变电站戶外部分被保护綫路入口处的附近。这样可以在結綫中省掉高频電纜和連接滤波器，而使通道的衰减降

低一些。但是这种做法会給运行带来很大的困难，因为这样一来，高频收发訊机就必須在戶外运行维护了。

連接滤波器和耦合电容器用来把高频設備接到輸电綫上，并把高频电流与工频电流分离开来。耦合电容器和連接滤波器都装有防护装置，以防高频电綫和高频收发訊机受过电压的襲击。防护装置是由避雷器 P 組成，而避雷器則并聯于連接滤波器綫路側的繞組上。同时还按規定装了接地刀閘 $3H$ ，这是在更換和檢修連接滤波器时，將耦合电容器下极板接地所必須的。个别情况下，耦合电容器上还附装有为自动重合閘或其他需要的抽取电压装置。

高频阻波器用来阻止高频电流流向变电站母綫，亦即作为被保护綫段的界限用的。高频阻波器对于給定通道的高频电流所呈現的阻抗很大，而对于工频电流來說，則阻抗非常小。

現在我們来研究一下继电保护高频通道的一些主要特点。

继电保护高频通道原則上可以用連續不断地通过高频电流的方式来运行，也可以仅在发生短路时启动高频发訊机后的一段时间內通过高频电流的方式来运行。在第一种情况下，不断地在綫路上发送高频电流；在第二种情况下，发訊机平时不工作，仅在继电保护启动元件动作后才启动。

連續通流方式較在短路时才启动的方式好处多些，因为可以不断地自动檢驗高频通道是否正常。

連續通流方式的缺点是增加了該通道对电力系統中其他頻率的高频通道的干扰作用，并且使发訊机的电子管损坏得很快。在苏联，現在仅用短路时启动的方式。在国外，則連續通流方式用得相当普遍。

继电保护通道所采用的高频频段，一般在 40~300 千赫范围内。这是輸电綫上包括电话通道和远动通道在内的一切高频联络的总频段。由于加工设备和连接设备在低频率时的实现方式比较复杂，采用低于 40 千赫的工作频率是很困难的，因为频率降低会使高频信号和工频电流分离的问题复杂起来。而采用高于 300 千赫的工作频率又会使綫路中高频能量的衰减大为增加。

继电保护通道是輸电綫上一切高频通道中最短的通道，故具有最小的衰减。由于它们总是限制在两个相邻变电站之間的一段綫路上，故相对地说，这些通道是比较短的。而通讯通道和远动通道一般延伸在綫路的好几个綫段上，因而具有较大的衰减。同时，考虑到电话和远动高频通道网的发展，有必要为这些通道选取最低的工作频率。此外，由于频段的低频部分已经很挤，因此保护通道必须选取上述频段较高部分的工作频率（高于 150~200 千赫）。短綫路上的保护通道，完全有可能采用高于 300 千赫以上的工作频率。因此，最近正在把 ПБЗК 型收发讯机的频段展宽到 1000 千赫。

继电保护高频通道的设备必须有极高的可靠性。

即使是一条分支綫保护的误动作，也可能使相当大的工业区断电，或者甚至使系统瓦解而引起更严重的损失。

所有设备都要不分昼夜的投入运行，并且要每时每刻都准备启动。因此，所有设备是不允许由交流电网来供电的，因为在发生短路时，变电站的自备电的电压可能会降低或者断电，以致该变电站所有的高频保护都拒绝动作。因此，高频收发讯机都要用 110 或 220 伏电压的蓄电池来作为电源，以供给所有的继电保护装置。

最近正在研究由交流操作设备供电给保护收发讯机的可