

高频保护复用方式工作原理及工作方案的分析与研究

许昌继电器研究所 张国义

高频保护是基于纵差动原理的一种线路保护方式。严格说来，高频保护根据采用高频通道的不同可分为微波保护和载波保护。但在习惯上，高频保护通常是指以电力线载波通道为继电保护信息传输途径的载波保护方式。本文所讨论的即是这种方式。

高频保护的工作原理是利用载波设备将继电保护信息调制成高频载波信号，通过输电线路传到对侧的载波设备，由对侧设备解调出保护信号并传送给对侧的继电保护装置，作为跳闸出口的一种判断依据。这种方式直接利用高压输电线路作为保护信号的传输通道，不需专门铺设通信线路，因而具有优越的经济性，同时通道具有高度的牢固性。另外，从保护原理上来说，高频保护具有选择性好、灵敏度高、动作迅速的特点。所以在世界各地电网中，这种保护方式被广泛地用作高压及超高压线路的主保护。

一 高频保护的工作方式概述

高频保护具有多种工作方式。根据电力线载波通道使用情况的不同，可以分为专用方式和复用方式；根据载波设备的工作制式不同，可以分为单频工作制和双频工作制；根据继电保护装置的工作原理不同，可以分为跳闸式、允许式及闭锁式保护。当然，还存在其它的分类方法，这里不再一一叙述。现在对上述几种方式进行一下简单比较，以便于后面分析问题。

1. 专用方式与复用方式

专用方式是指电力线载波设备及通道专门用于传输继电保护信号，而复用方式是指继电保护信号与调度通信话音信号、远动信号一起共用同一套载波设备调制并通过同一条载波通道传输。专用方式信号传输延时短，因而有利于提高保护的整组动作时间。另外，专用方式具有设备制造简单、运行维护方便的特点，由于这种方式需单独占用载波通道，因此造成载波频率的浪费。复用方式的主要优点是多种信号共用一条载波通道，节约有限的电力线载波频率资源。这种特点使得复用方式在大多数国家和地区的电力系统中得到了广泛应用。由于我国电力事业早期发展水平低，发展速度又较缓慢，多年来一直应用由高频收发信机构成的专用工作方式。近年来，国家电力事业发展很快，

各地电网程度不同地出现了载波通道拥挤，难以安排新通道的状况。因此，利用复用工作方式节省载波频率的优越性来解决运行部门所面临的这一难题，是一个切实可行的办法。

2. 单频工作制与双频工作制

如果线路两端的载波设备工作频率相同，每一端既能收到对端发来的高频信号，又能收到本端发出的高频信号，这样的方式称为单频工作制。如果两端载波设备各自具有不同的工作频率，每端设备就只能收到对端发来的高频信号，这样的方式叫做双频工作制。专用方式的高频保护可以是单频工作制，也可以是双频工作制，而复用方式的高频保护只能是双频工作制。由于单频工作制两侧工作频率相同，因此只需占用一个载波通道，而双频工作制则需占用两个通道，在我国，基本都采用单频工作制的专用保护方式。

3. 跳闸式、允许式和闭锁式

跳闸式是一种构成比较简单的保护方式。当每侧保护设备在其保护范围内故障而动作于跳闸的同时，经载波设备向对侧发出跳闸命令，可以不经过其它控制元件而直接使对侧的断路器跳闸。因此，这种方式也称为“直跳式”。

允许式是指以收到高频信号（注：为了便于叙述，特规定高频信号是指由保护信号调制的载波信号，并规定有高频信号是指有高频工作电流的状态。下面叙述中如无特别注明，含义即与此相同。）作为跳闸的必要条件；而闭锁式是指以收不到高频信号作为跳闸的必要条件。下面是这三种保护方式的逻辑关系图：

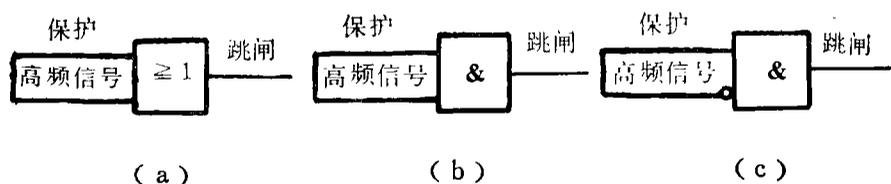


图 1 跳闸式、允许式、闭锁式保护的逻辑关系比较

从以上关系可以看出，对于跳闸式保护来说，收到高频信号是其跳闸的充分必要条件。因此，这种方式可靠性较差，只能用于远方切机等某些要求比较简单的情況。至于允许式保护，因为不能从原理上解决加工相故障时跳闸信号可靠越过故障点的问题，所以可靠性不如闭锁式保护。我们认为闭锁式保护较其它方式可靠性高，主要因为：

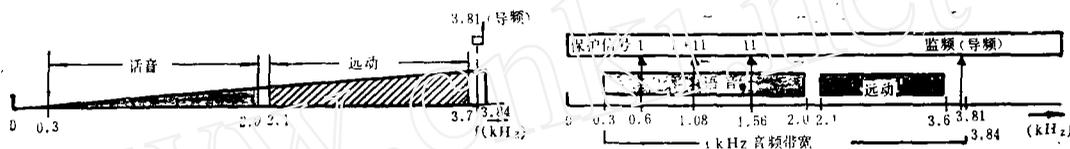
- (1) 闭锁信号只有在区外故障时才需要传送，因此不存在可靠越过故障点的问题。
- (2) 系统运行正常时出现干扰，保护装置将认为是闭锁信号，因而不会造成误动。

二 复用方式的基本工作原理

复用方式的电力线载波机是将各种音频信号进行迭加与复合，完成调制与传输的过程。根据CCITT和IEC的规定，电力线载波方式音频传输频带 4 kHz带宽的标准范围应

在0.3~4 kHz之间。要进行复用传输,就应将话音信号、远动信号及保护信号合理地安排在上述频带之内。根据频率分配方案不同,复用方式又可分为同时复用和交替复用两种方式。

所谓同时复用是指各信号的传输没有时间上的先后顺序,它们只是在音频传输频带内分占不同的频段,因此也称为“频分复用”。为了保证话音的不失真度和清晰度,话音频带一般安排为0.3~2.0kHz或0.3~2.4kHz,在我国,多数采用0.3~2.0kHz的分配方式,那么,远动信号、保护信号以及导频信号、铃频信号等都只能安排在2.0kHz以上的频带内,图2(a)是导频信号按照CITT通道129安排的同时复用方式的频率分配方案。由于各种信号分段占用频带,电力线载波机的发送功率将在各个信号之间分配,这样不利于提高保护的可靠性,因此这种分配方案极少用于线路保护,一般只用于传输电报、远动信号以及其它简单的远方控制信号。



(a) 同时复用方式

(b) 交替复用方式

图2 PLC复用方式音频传输频带的频率分配方案

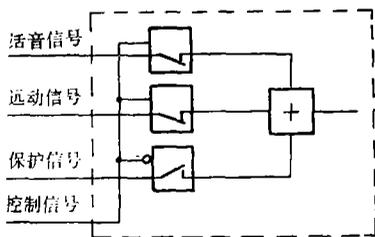


图3 交替复用方式的工作原理

因为保护信号在系统正常情况下不需用传送,在故障时传送保护信号所需用的时间也很短,所以适于采用交替复用方式。这种方式在一般情况下传送话音信号及远动信号,当保护起动时,切断话音信号、远动信号以及导频信号,以全功率传送保护信号(如图3所示),这种方式也称为“时分复用”。当系统要求远运传输不能中断时,保护信号应安排在话音频带内,这样,就可以做到传送保护信号时不中断远运传输。图2(b)是采用移频制的交替复用方式频率分配方案。

复用方式除具有上述节省频率的优点外,还具有一个重要优点。因为载波机一直发送一监频信号,监视通道的状况。如果通道出现异常,可以及时处理。这项特点对于提高保护的可靠性非常重要。

三 关于复用方式的允许式保护

前面已经分析过,允许式保护的可靠性不如闭锁式保护,因此在我国电力系统中很

少应用。但在欧美等许多国家，允许式保护却是一种普遍采用的线路保护方式。这主要有两方面的原因：

1. 虽然从原理上分析允许式保护的可靠性比闭锁式保护差，但允许式保护也有其自身的优点：

(a) 保护两侧的测量元件在灵敏度和动作速度的配合方面要求简单，保护装置相应比较简单。

(b) 由于无需象闭锁式保护那样人为地设置延时等待闭锁信号可靠地传送到对侧以及等待闭锁信号的消失，因此动作速度快，有利于构成快速保护。

2. 欧美等国家电力线载波系统运行方式与我国有别：

(a) 在我国，电力线载波系统的耦合方式基本都采用相一地耦合方式，而欧美等国家却普遍采用相一相耦合方式。相一相耦合方式比相一地耦合方式通道衰耗小得多。下面分别是两种方式下输电线路部分衰耗的工程计算经验公式：

$$A_{P-g} = K_{P-g} \sqrt{f} L + 2 A_0 \quad \text{式(1)}$$

$$A_{P-P} = K_{P-P} \sqrt{f} L \quad \text{式(2)}$$

- 式中
- A_{P-g} : 相一地耦合方式输电线路衰耗 (dB)
 - A_{P-P} : 相一相耦合方式输电线路衰耗 (dB)
 - K_{P-g} : 相一地耦合方式衰耗系数，取决于电压等级
 - K_{P-P} : 相一相耦合方式衰耗系数，取决于电压等级
 - A_0 : 始端衰耗与终端衰耗 (dB)
 - f : 工作频率 (kHz)
 - L : 保护区内载波通道长度 (km)

假设有一条220kV的输电线路，长度为150km，工作频率为300kHz，那么

$$K_{P-g} = 6.52 \times 10^{-3}; K_{P-P} = 4.17 \times 10^{-3};$$

$$A_0 = 1.31 \text{dB}$$

由式(1)和式(2)可得：

$$A_{P-g} = 19.56 \text{dB}; A_{P-P} = 10.83 \text{dB}$$

由此可知，相一地耦合方式输电线路衰耗比相一相耦合方式大得多。

另外，对于相一相耦合方式，单相接地故障对高频信号的影响较小。国际大电网会议(GIGAR)《电力线载波系统导则》中对此进行了比较详尽的分析，并得出结论：如果中相发生接地故障，通道对高频信号的衰耗将增加9.6dB，且与故障点的距离无关；如果边相发生接地故障对高频信号的影响虽然与故障点的距离有关，但衰耗的波动范围只有4dB。

可见，采用相一相耦合方式将大大提高允许式保护的可靠性。

采用这种方式的缺点是多占一相导线，且比相一地耦合方式多用一套加工设备。

(b) 在欧美国家，大多都采用复用型的电力线载波机构成高频保护。对于复用方式来说，由于信号传输延时较长，因此，构成允许式保护在时间配合上实现起来要容易得多。这一点在后面闭锁式保护的对比中将能得到明确的对比。

(c) 国外复用保护的接口设备大都采用故障时提升发信功率的工作方案,这也是提高允许式保护可靠性的有效措施。

由以上分析可以看出,如果电力线载波系统运行体制许可,允许式保护也有较高的推广应用价值。

四 单、双频工作制闭锁式保护的比较

为了便于进行后面的分析,我们首先以高频闭锁距离保护为例,比较一下专用工作方式时单、双频工作制的工作原理。

图4(a)和(b)所示分别是单频工作制和双频工作制距离保护动作原则。

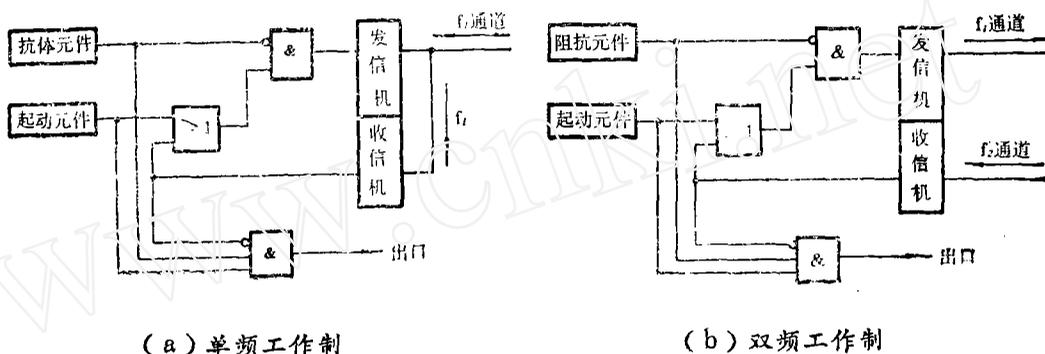


图4 高频闭锁距离保护的动作原则

从上图可以看出,对于单频工作制,跳闸出口须满足下面的条件:

- (1) 两侧均不发信,即无高频信号状态;
- (2) 本侧阻抗元件及起动元件动作。

对于双频工作制,跳闸出口须满足下面条件:

- (1) 对侧不发信,即无高频信号状态;
- (2) 本侧阻抗元件动作。

但从根本上讲,两种方式的跳闸条件是一致的,都取决于两侧设备阻抗元件和起动元件的工作状态。不相同的是,由于双频工作制的设备只能收到对侧发来的信号,阻抗元件和起动元件的动作时间配合原则与单频工作制不同。起动元件根据保护构成的具体方案不同,可能需要一种或两种不同的整定值。

顺便说明一下,在专用方式中,由于双频工作制需占两个载波通道,因此极少用于高频保护。对于远距离超高压的输电线路,由于相位传输延迟角较大,高频相位差动保护需要采用双频工作制来补偿由延迟角所形成的相位差。

五 复用方式闭锁式保护工作方案的探讨

由于我国目前高频保护大多数为闭锁式保护,因此探讨应用复用方式的闭锁式保护

的工作方案很有必要：下面提出几项方案，并进行一下简单的分析。

方案一：将两侧保护信号调制为不同频率的音频信号，交替复用传输。

如果两侧保护信号分别被调制为两个频率不同的音频信号，然后再调制为高频信号，那么，采用这种方式构成的高频保护，其动作原则及元件整定原则与专用方式双频工作制相同。

系统正常时，传送语音及远动信号，当某侧保护装置感受到反方向故障时，起动元件动作，切断上述信号，发送保护信号，闭锁对侧的保护装置。

前已述及，交替复用方式由于需要经过信号转换，且经过多级滤波器的延时，信号传输及返回时间均较长。根据实验，由无源滤波器实现的装置，在这种工作方式下，其信号传输与返回时间可分别达到约12ms和8ms，这样的时间比专用高频收发信机要长得多，但由此构成的闭锁式保护整组动作时间尚能满足系统运行的要求。

该方案适用于根据双频工作制原理设计的保护装置。

方案二：将两侧保护信号调制为频率相同的音频信号，交替复用传输。

由于国内多数保护装置是根据单频工作制的原理设计的，因此，需要一种与之相适应的配合方案。这是此方案提出的初衷。

我们知道，复用方式的高频保护只能是双频工作制，它与专用方式的不同之处在于，专用高频收发信机是将保护信号直接调制为高频信号，而复用型的电力线载波机必须先将保护信号调制为音频信号，然后才能调制到高频级进行传输。因此，我们可以将两侧保护信号调制为同一频率的音频信号，这样就使得每侧保护装置能够收到两侧的闭锁信号。其工作过程与方案一相同。当某侧发出闭锁信号时，两侧保护装置均被闭锁。按这种方式构成的高频保护，其动作原则及元件整定原则与专用方式单频工作制相同。

由于这种方式两侧传送保护信息的音频信号频率相同，所需音频带通滤波器的通带范围可以宽一些。因此，信号传输延时会有一定的缩短。

方案三：以导频信号作为闭锁信号。

为了监视通道状态，复用型的电力线载波机工作时一直发送导频信号（如图2中的3.78kHz信号）。这相当于专用机的长发信状态。我们可以将导频信号作为闭锁信号，在系统正常时，两侧保护装置均处于被闭锁的状态。当某侧保护装置感受到正方向故障时，阻抗元件动作，切断导频信号，这相当于保护停信状态，对侧保护装置将根据其阻抗元件是否动作判断是否跳闸。其跳闸条件为：

- (1) 本侧阻抗元件动作；
- (2) 收不到对侧导频信号。

这种方案的优点是：

- (1) 保护动作的逻辑关系简单，相应的装置简单，容易实现；
- (2) 不中断语音和远动信号的传输；
- (3) 适用范围广。

其缺点是，由于导频信号发送及接收滤波器通带均很窄（约80Hz），因此，导频信号的消失延时较长（约30ms）。虽然在构成具体保护方案时，不再需要预留等待信

号可靠传送到对侧的时间，但仍然会加长保护的整组动作时间。

另外，由于导频信号的发送电平较低，将使通道裕度变得很小。

方案四：以允许信号作为停信信号。

这种方案是以闭锁式保护的工作原理为前提，结合允许式保护的特点而提出的。

当区内非加工相故障时，两侧保护阻抗元件动作，切断语音、远动及导频信号，发出保护信号，该保护信号作为跳闸的允许信号（相当于停信信号），对侧收到该信号即动作于跳闸，当区内加工相故障时，如果通道衰耗增大使得收不到对侧的保护信号，那么，两侧保护即以收不到对侧导频信号作为跳闸的允许条件；当发生区外故障时，以导频信号闭锁远故障侧的装置。

综合起来，保护的跳闸条件为：

- （1）本侧阻抗元件动作；
- （2）收到对侧保护信号或收不到对侧导频信号。

可以看出，此方案和方案三的实质是一样的，由于保护信号的传输时间比导频信号的消失延时短得多，因此可以加快非间工相故障时保护的動作速度。这便是此方案的主要优点。

六 关于远方起信

在我国传统的保护装置中，多数都设有远方起信回路。远方起信并不是保护原理的要求，只是提高具体保护装置可靠性的一种措施。图4（a）及（b）中均有远方起信回路。当发生区外故障时，如果近故障侧的起动元件比远故障侧的阻抗元件动作或因某种原因拒动，将会造成远故障侧保护误动。所以，让远故障侧保护在阻抗元件动作之前先有一短暂发信，通过近故障侧的远方起信回路控制近故障侧发信，以达到可靠不误动的目的。这就是“远方起信”。对于复用方式的高频保护来说，远方起信并不是必须的措施，我们可以根据复用方式的工作特点采取其它合理的方案，防止上述误动情况的发生。下面对上述几个方案进行逐一的分析。

我们首先分析一下方案一的情况。如果发生区外故障时，远故障侧收不到对侧的闭锁信号，那么只有两种可能，一种可能是对侧起动元件没动作，否则就是通道故障。因此，根据是否收到对侧导频信号即可区分两种情况。如果导频信号正常，即可判断是对侧起动元件没动作，应闭锁本侧保护，这样，就能保证可靠不误动。

由于我国传统的保护装置都不具备这样的逻辑判断回路，因此限制了这种方案的适用范围。对于近年来国内新兴的微机保护，因其逻辑关系均由软件实现，根据不同的需要实现不同的逻辑关系比较容易，所以这种方案较适用于微机保护。为了广泛地应用复用方式的高频保护，新研制的保护装置也应该具备适用于复用方式的逻辑回路。

对于方案二，可遵循与方案一相同的原則。但为了使方案二能完全适用于常规保护装置，我们可以作另外一方面的尝试。从理论上分析，在保证可靠性的前提下，保护信号的传输时间可以缩短至5ms，这样，就可采用传统远方起信的方法实现这一目的。

对于方案三和方案四，由于属于长发信工作状态，不需用起动元件来起动发信，因此，根本不存在这一问题。这是这两种方案的又一重要优点。

七 关于键控移频调制 (FSK)

前已述及,对于复用方式,只能先将保护信号调制为音频信号,然后才能调制到高频级。因此,如何合理地调制保护信号,是一个十分重要的问题。

目前,允许式保护及远方跳闸的装置多采用键控移频调制(FSK),图2(b)所示的频率分配方案即是一例。这种调制方法的主要有下列优点:

(1) 可以顺序传输多路信号,充分利用电力线载波通道。

(2) 因为系统正常时,只发送监频信号,系统故障时,停发监频信号,改发跳频信号,如果监频信号与跳频信号同时存在,即判断为干扰信号,并闭锁保护装置。因此,这种调制方法有利于提高保护的可靠性。

(3) 工作原理简单,装置容易实现。

闭锁式保护的信号调制也以采用FSK方案为宜,这样,除传送一路高频保护信号外,还可以传送一路或两路远方跳闸等其它信号。但对于闭锁式保护来说,存在一个不利的因素。从前面的叙述中我们知道,由于音频传输频带有限,如果进行多路传输,就需用较窄的带通滤波器来分离各路不同的信号,这样将造成信号传输时间进一步延长。因此,增加传输路数只能在闭锁式保护所允许的范围之内,这是一对不可调和的矛盾。

八 结 束 语

由于我国长期采用相一地耦合方式,在目前推广应用允许式保护的可能性不大。因此,探讨在复用方式的前提下应用闭锁式保护的各种可行工作方案是非常必要的。上述几个方案只是进行了简要的定性分析,尚需结合装置实现和工程实践进行实质性的完善。

总的来说,采用复用方式构成闭锁式保护主要存在两个问题:

(1) 如何采取合理的方案,缩短信号传输时间;

(2) 是否将有无导频信号作为保护动作的一种判断依据。

近年来,国内运行单位及有关科研单位已经在开展这方面的研究试验工作,并取得了一定的进展。随着各种复用型设备的研制成功及在国内的逐步运行,将很快摸索出一条真正适合于我国电力系统运行要求的复用方式高频保护方案。

参 考 文 献

- [1] 输电线路高频保护. 金建源. 水利电力出版社. 1987.
- [2] 电力线载波系统导则. 国际大电网会议第35学术委员会. 1984.
- [3] 张国义、王能桂. ESB 500电力线载波机及其在复用继电保护中的应用. 《继电器》. 1990年第3期.
- [4] 山东工学院等. 电力系统继电保护原理. 水利电力出版社. 1979.
- [5] "General Description of SWT 500F₀". Siemens AG. 1986.
- [6] "General Description of SWT 400F₀". Siemens AG. 1981.