

输电线路相差动高频保护动作原理的研究

西安交通大学发电教研室 葛耀中

相差动高频保护是110~220千伏及更高电压的输电线路的一种主要保护。它的主要优点是动作原理上看在系统振荡,非同期重合闸及非全相运行时不会误动作,并且装置的继电部分比较简单。其主要缺点是高频通道部分较为复杂。在有分支线的条线下,保护的灵敏度会显著降低。为了克服后一缺点,曾提出过采用远方起动的办法,并在机电型装置上做过改进(文献1)

近年来,为了便于检查高频通道,在一些晶体管相差动高频保护装置中,例如JGX-11A(文献2)也采用了远方起动的办法。在无产阶级文化大革命中,为了适应330千伏超高压输电线路的需要又研制出JGX-1型晶体管相差动高频保护装置(文献3)。其特点是采用了频率调制的方法和正、负半周都进行相位比较,同时也采用了远方起动。这些新事物的出现都会给保护的动作用带来一定影响,因此有必要对相差动高频保护的动作用原理进行较为深入细致的研究以适应当前的需要。

在文献4中曾经对利用各种通道的继电保护的动作用原理做过一般的讨论。本文仅限于讨论我国目前应用最广的采用电力线载波高频通道和在故障时起动高频收发讯机的保护。

一、关于相差动高频保护的几个基本概念

1. 相位比较的两种方案

相差动高频保护有两种相位比较的方案,一种是只有半周(正或负半周)进行相位比较;另一种是正和负半周都进行相位比较。只有半周比较相位的保护比较简单,但动作时间较长(文献5),广泛应用在110~220千伏的输电线路。正和负半周都进行相位比较的方案比较复杂,当正、负半周相位比较组成“或”门作用于跳闸时,可以使保护的动作用时间比半周比较相位时缩短约10毫秒;当正、负半周相位比较组成“与”门作用于跳闸时,可以减小保护装置误动率,但是增大了装置的拒动率,其动作时间与只有半周进行相位比较相当。正、负半周都进行相位比较的方案在330千伏以上的超高压输电线路得到了应用。

2. 相位信号的传送方法

为了比较被保护线路两端电流的相位,必须将一端的电流相位信号传送到另一端,在电力线载波高频通道的条件下,电流相位信号对高频电流进行调制,然后传送到对端去,因为只要传送电流相位的信号,所以被比较的电流(又称为操作电流)首先经过方波形成(放大

限幅)变成反映电流相位的方波,再对高频电流进行调制,通常把它称为操作方式。一般有幅度调制和频率调制两种方法,如图1所示。

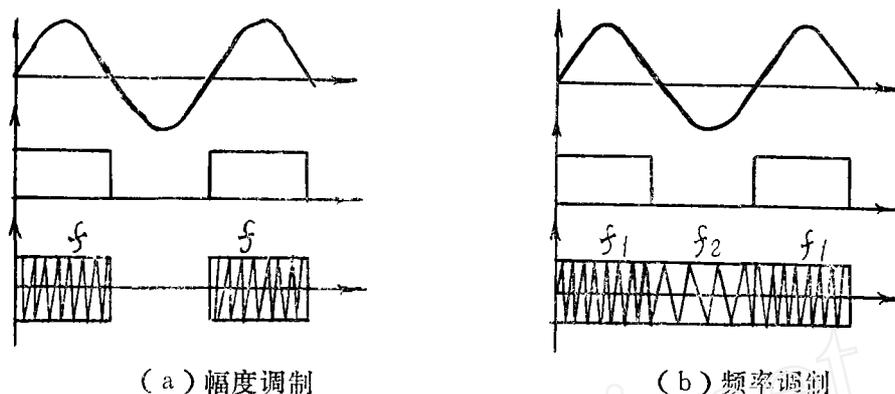


图1

由图1可见,两种调制方法都可以将电流相位反映出来。在幅度调制方法中(图1,(a)),电流相位是用有无频率为 f 的高频电流来决定的,在频率调制方法中(图1,(b)),则是用不同频率 f_1 和 f_2 的高频电流决定的。例如有 f_1 时相当于电流的正半周,有 f_2 相当于电流负半周。此处也曾做过将电流波形完全传送到另一端进行相位比较的研究(文献6)。在一般情况下,由于图1,(a)所示的幅度调制方法比较简单,也能满足要求,因此在国内外得到了广泛的应用。

3. 高频通道的工作方式

有两种工作方式:一种是长期发讯,另一种是故障时起动收发讯机。在长期发讯的工作方式下,收发讯机经常处于工作状态,在高频通道中经常流过高频电流,因此又称为正常有高频电流通道。在故障时起动收发讯机的工作方式下,收发讯机只在故障时才工作,向高频通道中送出高频电流,而正常时不送出高频电流,因此又称为正常无高频电流通道。长期发讯的主要优点是高频收发讯机和通道经常处于被监视状态,可靠性较高;此外也无需收发讯机的起动元件,可使装置简化和提高灵敏度,但要根据具体情况考虑相邻通道的干扰及使用元件的寿命等问题。故障时起动收发讯机的方式的优缺点与长期发讯方式相反。目前国外两种方式都有应用,以故障时起动方式较多。我国目前都采用故障时起动收发讯机的方式,但长期发讯方式也是值得研究采用的。

4. 高频收发讯机的工作频率

根据高频收发讯机的工作频率可以分为单频率制和双频率制两类:按单频率制工作的收发讯机,两端收发讯机的工作频率相同,任何一端的收讯机不仅收对端发讯机送出的高频电流,同时也收本端发讯机送去的高频电流;按双频率制工作的收发讯机,两端收发讯机的工作频率不同,任何一端的收讯机只收对端发讯机送出的高频电流,不收本端发讯机送出的高频电流。

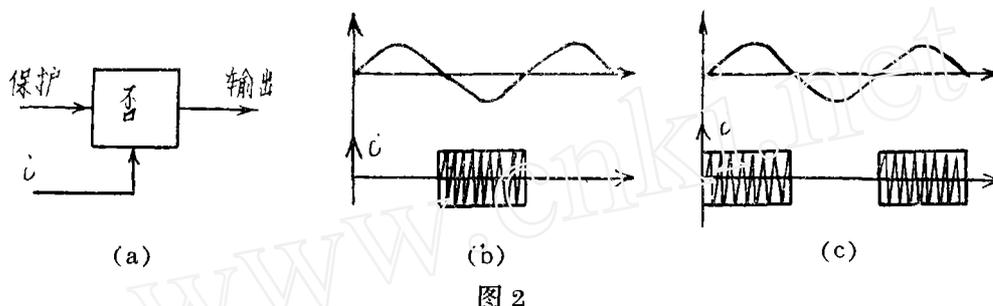
单频率制占频带较窄,双频率制占频带较宽,一般情况下,多采用单频率制。在线路较长的条件下,为了补偿高频电流传送时引起的相位误差(每100公里约为 6°),须采用双频

率制(文献7、3)。

5. 高频电流信号的性质

高频电流信号的性质可以分为闭锁信号和允许信号两种。

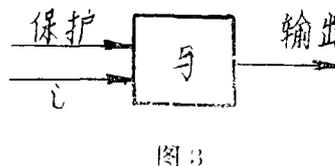
闭锁信号是使保护不动作的信号。在正常无高频电流通道的条件下,收不到高频电流 i 是保护动作的必要条件。闭锁信号可用图2、(a)的方框图表示。同时应该指出,对相差动高频保护,信号性质不仅由是否收到高频电流 i 决定,还由收到高频电流与反映本端电流相位的信号的相对关系决定。例如,在图2、(b)中,对于负半周进行相位比较的保护,由于在电流负半周时收到高频电流 i ,保护无输出,故为闭锁信号。但在图2、(c)中,虽然也收到高频电流 i ,但因高频电流不是在负半周时收到的,保护有输出,所以不是闭锁信号。



允许信号是使保护动作的信号。在正常无高频电流通道的条件下,收到高频电流是保护动作的必要条件。允许信号可用图3的方框图表示。同上所述,对相差动高频保护,在负半周比较相位的条件下,图2、(b)与图2、(c)虽然都收到高频电流 i ,但图(b)为收到允许信号,保护有输出;图(c)为无允许信号,保护无输出。

闭锁信号和允许信号的特点如下:

a、闭锁信号在外部故障时起作用,因此它沿非故障线路传送;允许信号在内部故障时起作用,因此沿故障线路传送。由于输电线路本身是高频通道的组成部分,输电线路故障将破坏高频通道或产生不利影响。因此,在电力线载波高频通道的条件下,闭锁信号的通道可靠性较高。



b、从抗干扰能力看,对于抵消已有的高频电流比较困难;而在高频电流时,增生出该频率的电流比较容易。因此,对于闭锁信号,由于干扰产生的误动作率较小,拒动作率较大,对允许信号则相反。一般情况下,外部故障总比内部故障次数为多,因此采用闭锁信号亦较有利。

c、与信号性质无关,如果应用单频率制,当半周比较相位时(例如负半周),必须在前半周时(例如正半周)发讯,否则不能保证正确动作。应用双频率制时则无此限制,比较灵活。

6. 无电流操作状态

对相差动高频保护不仅要分析发讯机的操作电流足够大的情况,也必须分析较小甚至为零的情况,这一问题处理不好也会引起保护的误动或拒动。无电流操作状态是指操作电流很

小或为零时，发讯机的工作状态。

在幅度调制时，有两种无电流操作状态：第一种是当操作电流 $I = 0$ 时，发讯机送出连续的高频电流 i （图 4，（a））；第二种是当操作电流 $I = 0$ 时，发讯机不送出高频电流（图 4，（b））

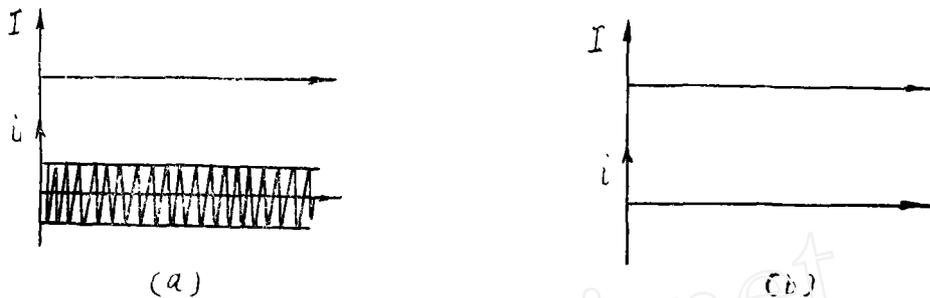


图 4

在频率调制时，有三种无电流操作状态：第一种是当操作电流 $I = 0$ 时，发讯机送出相当于正半周操作的连续的高频电流 f_1 （图 5，（a））；第二种是当操作电流 $I = 0$ 时，发讯机送出相当于负半周操作的连续的高频电流 f_2 （图 5，（b））；第三种是当操作电流 $I = 0$ 时，发讯机不送出高频电流（图 5，（c））。

采用那一种无电流操作状态比较合理，要根据具体条件综合考虑决定。

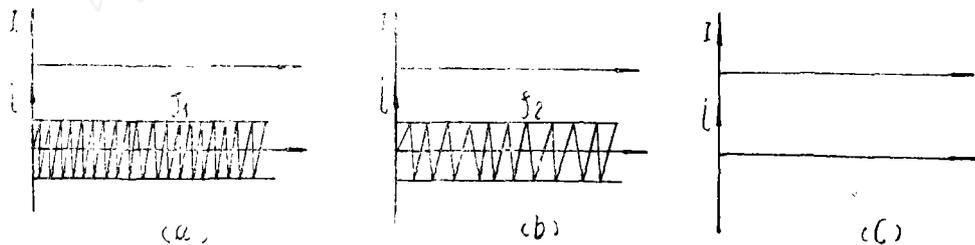


图 5

7. 远方起动

远方起动是当线路两端的任何一端（例如 m 端）的发讯机起动后，发送出高频电流，对端（例如 n 端）收讯机收高频电流时即作用于起动 n 端的发讯机。在有远方起动时，任何一端发讯机起动都将使另一端发讯机也起动发讯。远方起动给检查高频通道带来了方便，也可简化装置和提高灵敏度，另一方面也必须注意远方起动给保护动作带来的影响。

二、比较电流半周相位的高频保护

由以上分析可知，在电力线载波条件下，通常采用幅度调制和闭锁信号。其中又可分为第一种无电流操作状态（图 4，（a））和第二种无电流操作状态（图 4，（b））两类。这两种无电流操作状态已在文献 4 中作过比较，但未涉及有远方起动的情况。

1. 采用闭锁信号和第一种无电流操作状态的保护

这是目前国内外在比较电流半周相位的高频保护中广泛采用的一种原理。为了保证选择

性，在装置中设有两套起动元件：低值起动收发讯机，高值起动继电器部分。在不采用远方起动时，这种保护在下列情况下，能保证正确动作：

- a. 在两端电源线路或环网内部及外部故障，正确动作；
- b. 在单端电源线路内部及外部故障，正确动作；
- c. 一端合闸，线路有故障，能切除故障线路；
- d. 外部故障切除后，起动元件未返回前，当操作电流较小或为零时，不会发生误动作。

当采用远方起动时，采用这种动作原理的保护装置有可能发生拒绝动作。例如输电线路从一端（例如m端）合闸，线路有故障，合闸端的收发讯机由起动元件起动，未合闸端（n端）收讯机收到高频电流时即起动n端发讯机。由于n端无操作电流，于是向m端发出连续的高频电流，m端的保护被闭锁，发生拒绝动作。在自动重合闸的过程中也有类似的情况。为了防止拒绝动作，可采用以下方法：

a. 当远方起动只用在便于检查高频通道时，装置中仍用两套起动元件，这时可以采用延远方起动的办法（文献3）。远方起动的延时应大于保护装置的动作时间。

b. 当装置中只用一套起动元件时，可以采用断路器处于断开位置时停讯的方法（文献2、2）。这种方法的缺点是使装置复杂，可靠性降低，并且也不能完全解决拒绝动作的问题。例如当线路两端断路器都处于合闸状态，线路内部故障，而一端操作电流很小或为零时仍将拒绝动作，这种情况在单端供电或环网内是会出现的。

c. 在采用双频率制时，可以应用测量高频电流信号宽度的方法，其动作原理如图6所示。当操作电流足够大时，收到高频电流信号的宽度接近 180° ，鉴宽环节无输出，保护按原来原理动作。当操作电流变小时，高频电流的信号宽度增大，到操作电流为零时，其宽度大于 360° ，保护被闭锁，但此时鉴宽环节有输出，只要起动元件动作，就能通过“与”门作用于跳闸。为了保证与原有保护配合，鉴宽环节有输出的条件应大于 $360^\circ - \alpha_L$ （ α_L —闭锁角）。

应该指出，采用鉴宽方法后又带来了新的矛盾，即当外部故障切除后，起动元件未返回前，而操作电流很小或为零时又可能发生误动作。这个问题可用使保护的动作时间大于起动元件的返回时间的方法来解决，这时为了不加长保护的动作时间，应使用具有快速返回的起动元件。防止上述误动作的另一方法是在“与”门（图6）后加入一次脉冲环节，“与”门有输出时，只有一固定时间的短脉冲作用于出口

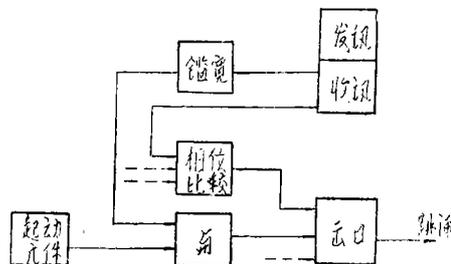


图 6

跳闸，到“与”门输出消失时立即准备好再次动作。为了保证在内部故障时可靠动作，并且在外部故障切除时，起动元件未返回前又不误动作，短脉冲的宽度应大于出口环节的动作时间，并小于外部故障的最小切除时间，一般可取为20~30毫秒。

2. 采用闭锁信号和第二种无电流操作状态的保护

这种保护的特点是当操作电流为零时不发出高频电流。在不采用远方起动的条件下，这种保护原理不如上一种，因为在外部故障切除后，起动元件未返回前，且操作电流很小或为零时可能发生误动作；此外，当线路负荷电流较小时不发生高频电流，因此在轻负荷时不便

于检查高频通道。

在采用远方起动时，这种保护原理的优点是不会发生拒绝动作，但可能发生上述误动作。为了防止误动作，可采用以下方法：

a. 使保护的动作时间大于起动元件的返回时间。这种方法最简单。

b. 采用闭锁措施，即应用测量高频电流间断时间（间矩）对保护进行闭锁，其动作原理如图 7 所示。当操作电流足够大时，收到高频电流的间矩接近 180° ，间矩测量无输出，保护照常动作。当操作电流间矩变小时，间矩的宽度增大，到操作电流为零时，其宽度大于 360° ，保护被闭锁。为保证不发生误动作，保护的动作时间应大于间矩测量的时间。这种方法对单频率制是适用的，对双频制则可能在内部故障，由于通道破坏收不到对端的高频电流时，将保护误闭锁。

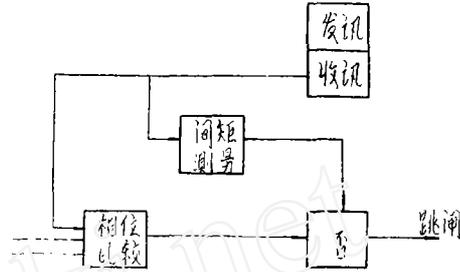


图 7

c. 采用反映本端电流相位的方波 $U_{方}$ 与操作发讯机的方波 $U_{操}$ 相互独立的方波形成环节，其动作原理如图 8 所示。图 8 对应于正半周进行相位比较，负半周进行操作的情况。这种保

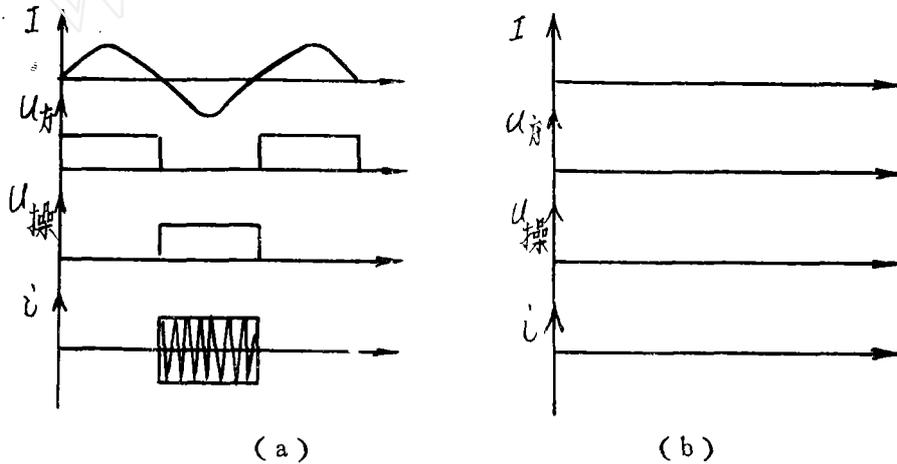


图 8 (a) 当操作电流 I 足够大时；
(b) 当操作电流 $I = 0$ 时。

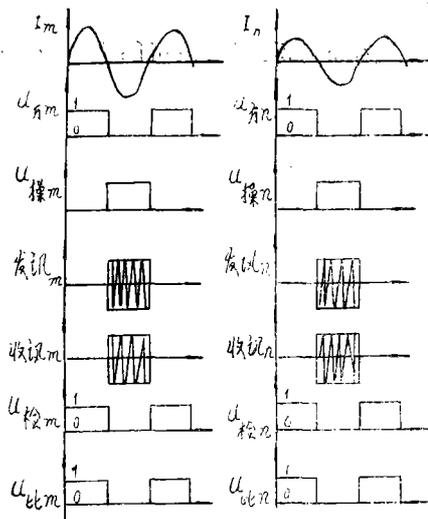
护的动作情况如图 9 所示。图 9 中相位比较元件的动作条件为： $U_{方}$ 与 $U_{检}$ 都为“1”时， $U_{比}$ 为“1”，相位比较元件有输出。

由图 9 可见，这种保护可以保证在上述各种情况下正确动作。为了防止当外部故障切除后，起动元件未返回前，由于两端方波形成的灵敏度不同发生误动作，应该满足

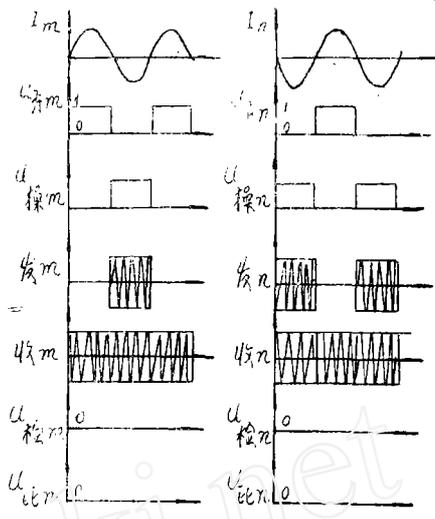
$$U_{方} = K_k U_{操}$$

式中 K_k ——可靠系数， $K_k > 1$ 。

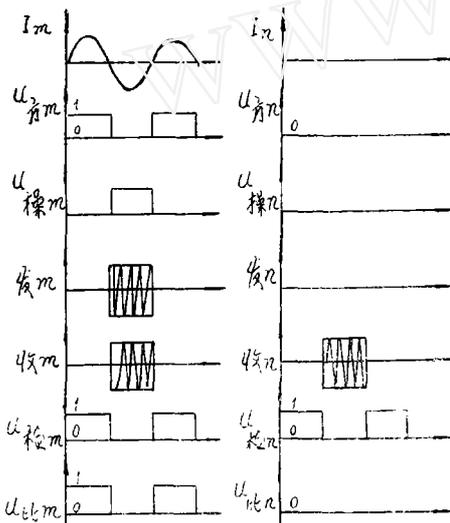
当起动元件的返回时间小于保护的動作时间时，可取 $K_k = 1$ 。



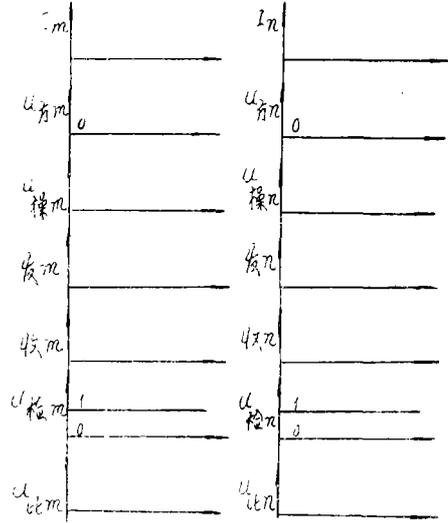
(a) 内部故障 (两端保护都动作)



(b) 外部故障 (两端保护都不动作)



(c) 一端合闸 (m端) 线路有故障, 有远方启动时, (合闸端保护动作)



(d) 外部故障切除后, $I_m = I_n = 0$ (两端保护都不动作)

图 9

三、比较电流正、负半周相位的高频保护

在超高压远距离输电线路, 为了减小保护的動作时间或提高保护的可靠性, 可用电流正、负半周都进行相位比较的方法构成保护。由于要补偿高频信号沿输电线路传送所引起的相位误差, 须采用双频率制。下面对用幅度和频率两种不同调制方法构成的保护的動作原理分别进行分析讨论。

1. 采用幅度调制的保护

在采用幅度调制时(图1, (a)), 由于正、负半周是互相规定的, 因此, 如果正半周为有高频电流时动作, 负半周的动作条件就只能是无高频电流时动作, 反之亦然。从高频信号的性质来看, 正、负半周不可能都是允许或都是闭锁信号。由此可见, 幅度调制方法应用于两个半周都进行相位比较时是有限制的。在这种情况下, 高频通道的破坏会造成保护的延时动作或拒绝动作, 这里与所采用的相位比较回路的构成方法有关:

a. 对于任何半周相位比较动作就动作于跳闸的保护(图10), 如果内部故障发生在允许信号半周内时, 通道破坏将会使保护的動作时间增大约10毫秒, 因为一直等到闭锁信号性质的半周相位比较动作后才能作用于跳闸。

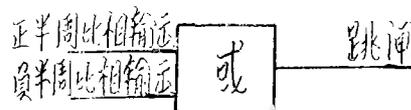


图10

b. 对于正、负半周相位比较都动作才作用于跳闸的保护(图11), 如不采取相应措施, 在通道破坏时, 由于允许信号半周的相位比较不能动作, 将使保护拒绝动作。

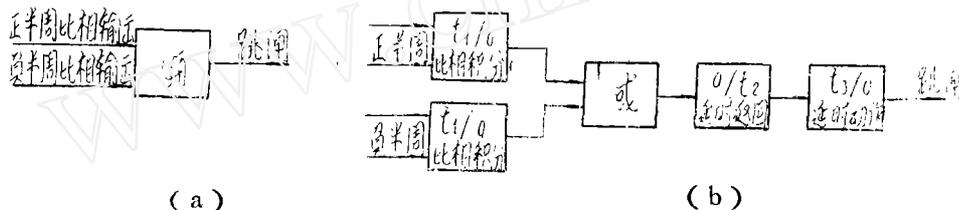


图11

为了保证在通道破坏时, 保护仍能作用于跳闸, 一般可采用当收不到高频电流时, 将图11切换成半周比较动作就作用于跳闸。在图11, (a)中可将“与”门切换为“或”门, 在图11, (b)中可将延时返回环节 $0/t_2$ 切换成 $0/t_2 + 10$ 毫秒, 后者用在JGX-1A型相差动高频保护中(文献3)。也可以采用收不到高频信号和起动元件动作组成“与”门作用于跳闸。从简化装置, 动作时间和便于设计调试等方面看, 图11, (a)较为优越。

在用幅度调制实现正、负半周都进行相位比较的保护时, 比较简便和理想的方案是用两套独立的比较半周相位的保护, 其中一套为电流正半周比相, 另一套电流负半周比相。在这种情况下, 两套都可按闭锁信号原理构成, 并采用相应的无电流操作状态。这时动作时间可比用一套时缩短约10毫秒。此外, 也便于对保护装置分别进行试验检查, 有利于提高保护的可靠性。

2. 采用频率调制的保护

在采用频率调制时(图1, (b)), 由于正、负半周相互独立, 都各有自己的频率, 因此有可能按各种动作原理构成保护。假定线路一端(例如m端)的正、负半周分别以频率 f_1 、 f_2 表示, 另一端(例如n端)的正、负半周分别以频率 f_3 、 f_4 表示, 则当内部和外部故障时, 两端高频收发讯机的工作情况如图12所示。图中 $U_{方+}$ 和 $U_{方-}$ 为对应于操作电流的正和负半周的方波, 它们既用作相位比较, 同时也操作高频发讯机, 发生相应频率的高频电流。由图12可以看出, 为保证保护在内部故障时可靠动作, 在外部故障时不动作, 当相位比

较元件动作的一个条件是 $U_{方+}$ （或 $U_{方-}$ ）为“1”时，另一个条件则由收到的高频电流决定。这时两端收到高频电流的不同组合方案如表1所示。

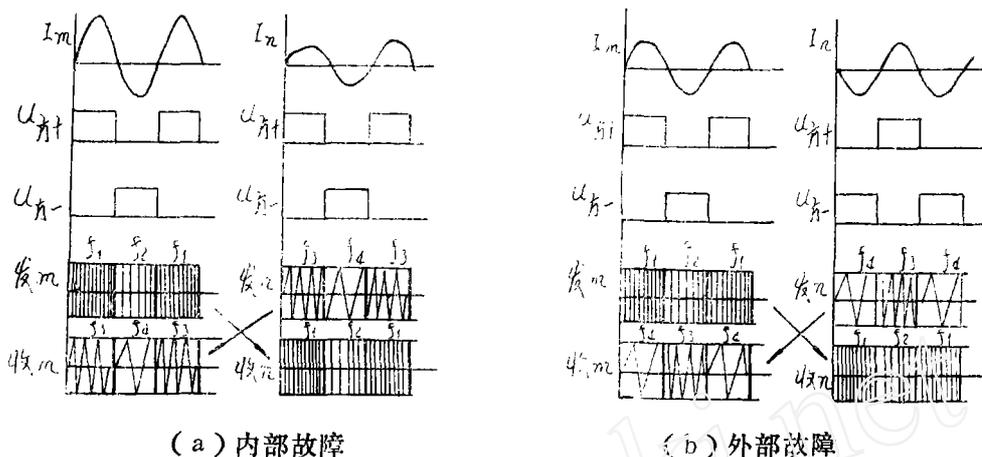


图12

表1

方 案		1	2	3	4	5	6
m 端	正半周比相	有 f_3	无 f_4	有 f_3	无 f_4	有 f_2	无 f_4
	负半周比相	有 f_4	无 f_3	有 f_4	无 f_3	无 f_3	有 f_4
n 端	正半周比相	有 f_1	无 f_2	无 f_2	有 f_1	有 f_1	无 f_2
	负半周比相	有 f_2	无 f_1	无 f_1	有 f_2	无 f_1	有 f_2

从高频电流信号的性质来看，在表1中：

方案1：两端正、负半周相位比较都是允许信号；

方案2：两端正、负半周相位比较都是闭锁信号；

方案3、4：一端都是允许信号，另一端都是闭锁信号；

方案5、6：两端都是半周为允许信号，另半周为闭锁信号。

在电力线载波高频通道的条件下，从保证通道工作的可靠性出发，宜于采用都是闭锁信号性质的相差动高频保护（方案2）。分析结果说明JGX-1A型晶体管相差动高频保护是两端都是半周为允许信号，另半周为闭锁信号（方案5、6）。在这种情况下，虽然也可以采取措施保证保护的可靠动作，但使保护复杂化了。

保护的正确动作不仅与高频电流的信号性质有关，也与无电流操作状态有关。

在无远方起动的条件下，当采用方案2（表1）时，无论采用那一种无电流操作状态都不会引起拒绝动作。例如当一端合闸线路有故障时，未合闸端发讯机不起动，不送出高频电流，合闸端保护的、正、负半周比相都收不到闭锁信号，可靠动作。当外部故障切除后，起动元件未返回前，操作电流又为零时，保护的、动作情况如下：

a. 当两端都采用第一种无电流操作状态时（图5，（a）），动作情况如图13，（a）所示；当两端都采用第二种无电流操作状态时（图5，（b）），动作情况如图13，（b）所示。由图可见，前者两端正半周相位比较可能误动作，后者两端负半周相位比较可能误动

作。因此，对于两个半周比相都动作才作用于跳闸的保护不会误动，对于任何半周比相动作就作用于跳闸的保护可能发生误动作。在后一种情况下，可采用使保护的動作时间大于起动元件等措施防止误动作。

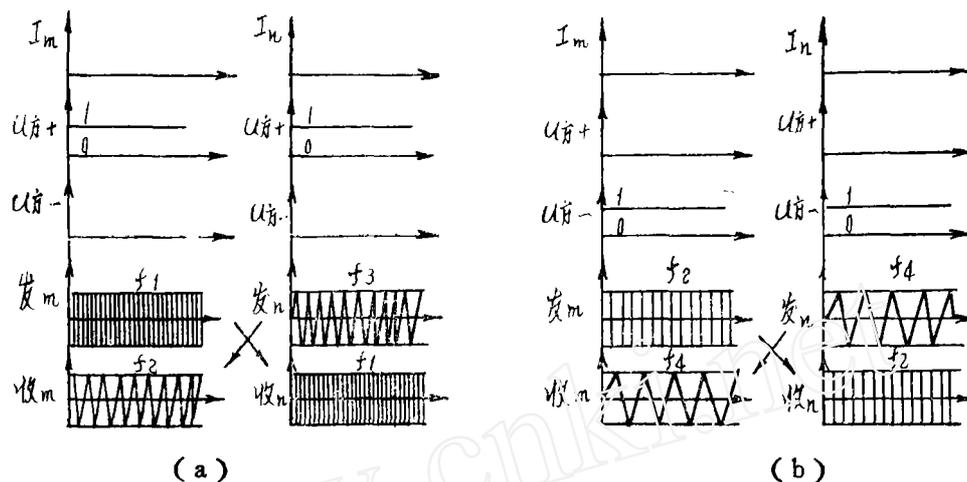


图13

b. 当一端（例如m端）采用第一种无电流操作状态，另一端采用第二种无电流操作状态时，两端相位比较元件都不会误动作，如图14所示。由图14可见，两端正、负半周相位比较都不符合动作条件，因此都不会误动作。

这种方法用在JGX-1A型相差动高频保护中（文献3）。这种方法的缺点是两端装置不完全一致，给调试和运行带来不便。

在有远方起动的条件下，采用第一种或第二种无电流操作状态（图5）都可能引起半周比相拒绝动作（例如一端合闸，线路有故障）。对于两个半周比相都动作才作用于跳闸的保护将拒绝动作，对于任何半周比相动作就作用于跳闸的保护不会拒动，但动作时间可能增大。

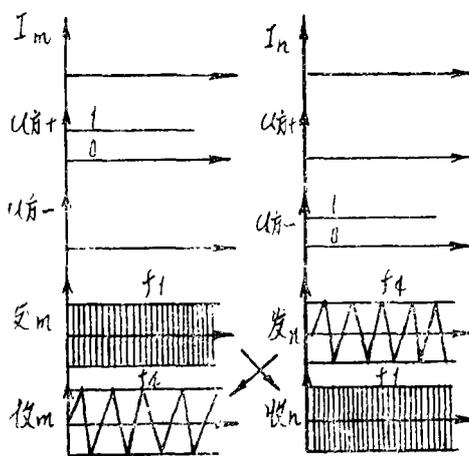


图14

当采用第三种无电流操作状态时（图5，（c）），不会发生拒绝动作。例如在一端合闸线路有故障时，未合闸端虽被远方起动，但发讯机不发出高频电流，因此不会闭锁合闸端的保护。为了防止在外部故障切除后，起动元件返回前发生误动作，也应考虑相应的措施（参看半周比相采用第二种无电流操作状态的保护）。

四、结 论

1、在110—220千伏的输电线路，采用只比较电流半周相位的高频保护一般都能满足要求。在电力线载波和正常无高频电流通道（在故障时起动收发讯机）的条件下，从提高通道可靠性出发，应优先采用闭锁信号。此时可采用幅度调制和第一种无电流操作状态（图4，（a））。在有远方起动的情况下，为了防止保护发生误动作，可采取本文阐述的附加措施；也可以采用第二种无电流操作状态（图4，（b））构成保护。

2、在330千伏以上的输电线路，为了减小保护的动作时间，可采用比较电流正、负半周相位的高频保护。

a.在应用一套相差动高频保护时，如采用幅度调制方法，正、负半周相位比较只能按不同性质的信号原理构成，即半周为闭锁信号，另半周为允许信号。如果采用频率调制方法，则正、负半周相位比较可以按任何性质的信号原理组成，在电力线载波条件下，两端正、负半周相位比较宜于采用闭锁信号，并采用第三种无电流操作状态（图5，（c））。

b.在应用两套相差动高频保护时，采用两套分别比较电流正、负半周相位和幅度调制的保护是较好的。在这种情况下，不仅可以减小保护的動作时间，同时保护装置也不比用一套频率调制时复杂多少，并且可以给运行、检查、维护带来较大方便。

c.为了使保护更加完善，能反映更多种短路故障，可使正、负半周相位比较用不同的电流组成。例如半周采用 $I_1 + kI_2$ ，另半周用 I_0 ；或半周用 I_2 ，另半周用 $I_1 + kI_0$ ；或半周用 $I_1 + kI_2$ ，另半周用 $I_1 + kI_0$ 等。总之，根据要求，对于常见的或较严重的故障有两个半周都能动作，而对于稀有的故障也有半周相位比较能够动作。

3、本文在有远方起动的情况下对保护动作原理的分析也基本上适用于采用长期发讯的条件。

参 考 文 献

- 1、利用高频发送机远方起动原理提高相差动高频保护性能的研究
贺家李、李广铃 天津大学学报1964年第16期
- 2、JGX—11A型晶体管相差动高频保护装置说明书 南京水电仪表厂
- 3、JGX—1型晶体管相差动高频保护装置说明书 南京水电仪表厂
JGX—11A型晶体管相差动高频保护装置 330保护小组、南京水电仪表厂、西安交通大学
- 4、利用各种通道继电保护的一般原理 葛耀中 西安交通大学学报1962年第2期
- 5、利用通道相位差动保护中相位比较元件的构成方法 葛耀中 陕西省电机工程学会论文集
- 6、半导体高频双相差动保护 郑本荣 天津大学研究生论文
- 7、DΦK—1型相差动高频保护 东北技改局