

极性比较式行波方向载波保护的几个问题

西安交通大学电机系 葛耀中 田又涵

前 言

极性比较式方向载波保护是70年代研制成功的一种新型保护^[1]，它具有装置简单和动作迅速的特点，引起了人们的重视和兴趣。这种保护与常规保护不同，它的动作基于行波原理，反应故障分量的初始极性关系，因此称为极性比较式行波方向保护^[2]。目前，对这一新型保护的動作原理、保护装置的构成以及整定计算等很多方面问题的认识还处于起始阶段，为了能使这一保护不断完善和发展，并能被正确使用，对这种保护进行研究是十分必要的。

本文利用贝瑞隆法计算电力系统短路暂态过程的计算程序^[3]对几种典型的超高压电力系统模型进行了大量计算，在此基础上对极性比较式行波载波保护的几个重要问题，例如极性问题，选相问题，载波信号性质的选择问题以及合闸到故障线路等问题进行了研究，得到了一定的结果。本文是在一次系统暂态过程计算结果的基础上进行分析的，可供设计、使用参考。

极 性 问 题

极性问题是极性比较式行波方向载波(高频或微波)保护的核心问题。在文献〔2〕中利用故障时产生的行波对保护的動作进行了分析，说明了保护有明确的方向性，即在保护规定的正方向故障时，电压波和电流波异极性；在反方向故障时，电压波和电流波同极性。为了证实这一结论，我们做了动模试验，并对图1所示的几种典型线路的故障分量进行了计算。计算是在线路不同地点进行的，在计算中考虑了各种对称和不对称故障及不同的故障相位(0—180°)。现将对千余条曲线的分析统计结果归纳如下：

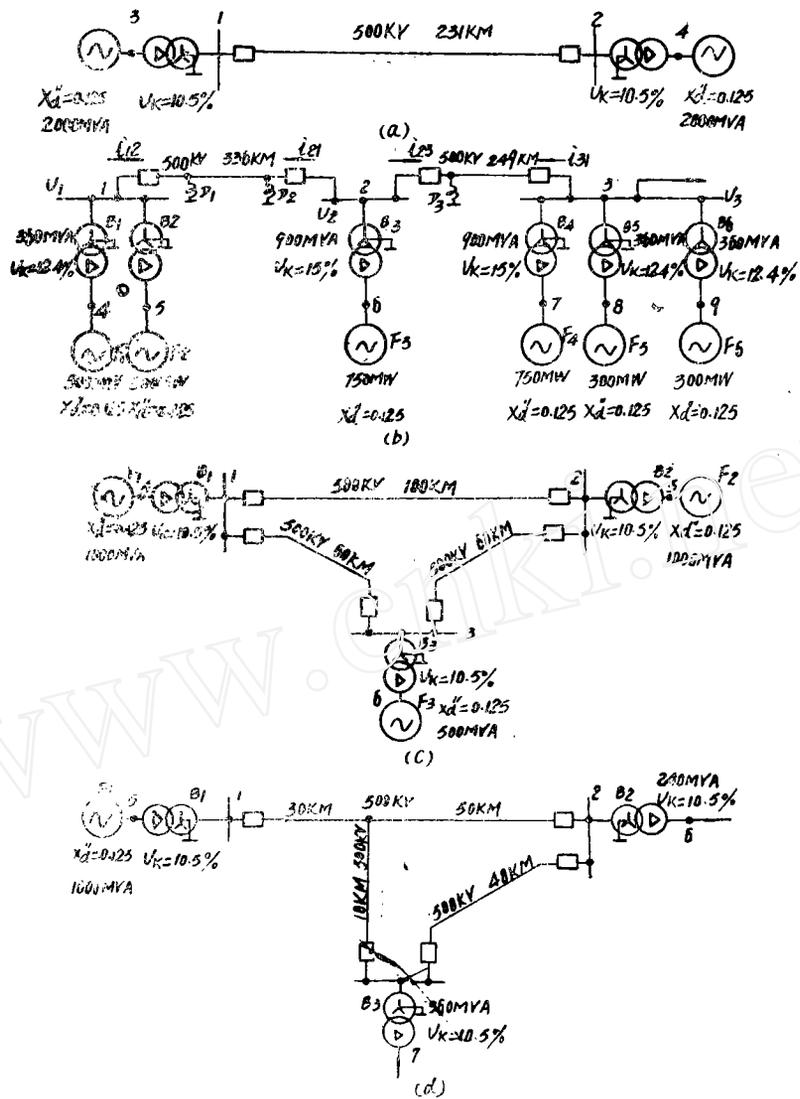


图 1

一、故障相

故障相可区分为故障线路的故障相和非故障线路的故障相，前者为线路内部故障，后者为线路外部故障。分析结果表明：

1. 除个别特殊情况外（见后文）极性关系均符合一般规律，即内部故障时线路两端电压、电流的初始极性相异；外部故障时，近故障端的电压、电流极性相同，远故障端

的电压电流极性相异。图 2 中给出了线路 L1 (图 1(b)) 1 节点内部在故障相位为 0° 和 90° 时发生 A 相单相接地时的电压、电流故障分量的波形。

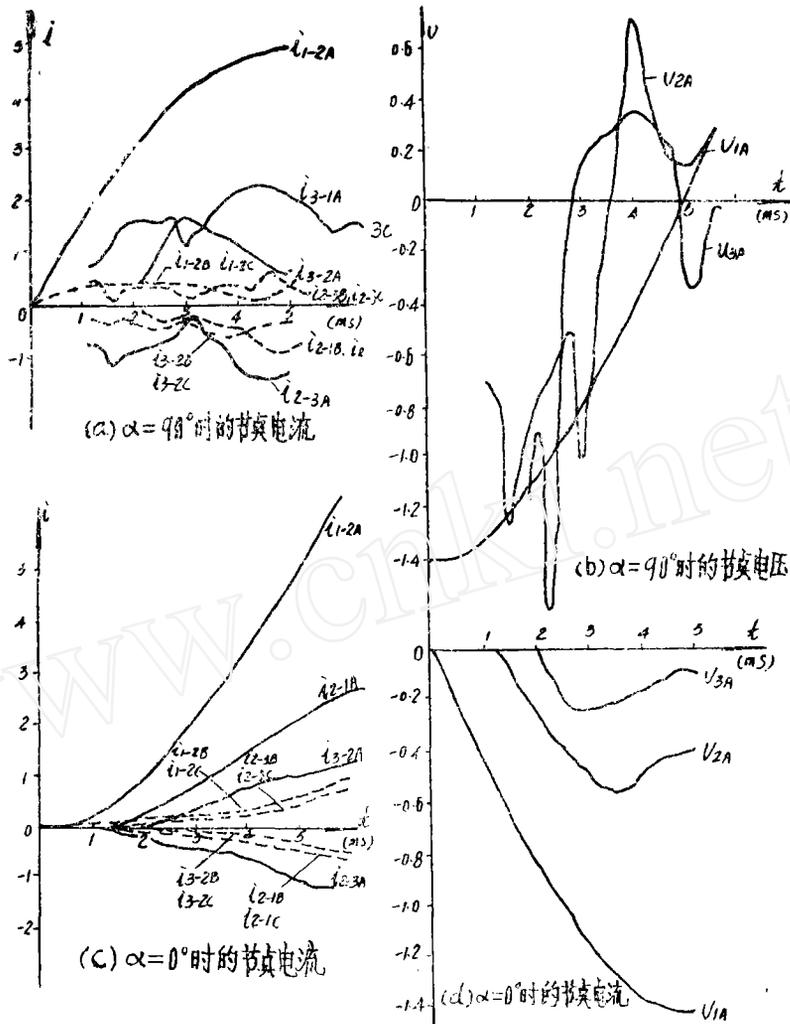


图 2

2. 在任何相位发生故障均能保证在故障瞬间的正确电压电流极性关系。应该强调指出的是故障发生在电压过零前某一时刻的特殊情况。这时, 在故障发生的瞬间虽然出现正确极性的电压和电流, 但紧接着极性就要翻转, 由于电压和电流不同时翻转, 就存在着错误判断极性的可能, 这一问题必须重视和解决。

在图 3 中给出了线路 L1 (图 1 b) 2 端内部在电压过零前 10° 、 20° 、 30° 时发生单相接地故障时的电压电流波形, 由曲线可见, 在故障相位为 150° 时, 故障点所加电压于 1.66 毫秒变换极性, 而电流则延迟到 3 毫秒后过零, 在故障相位为 160° 或 170° 时, 极性变换更快, 但电流幅值较小。在极性比较式行波方向保护中必须注意到上述可能漏掉初

端正确极性而可能发生误判断的情况。

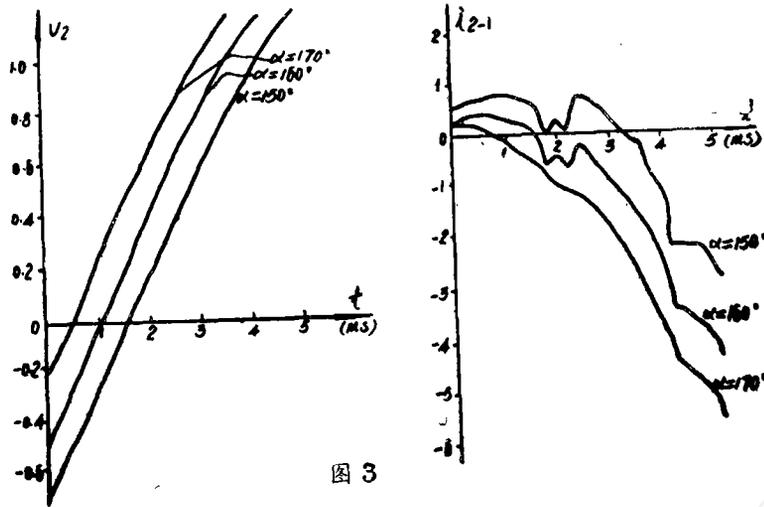


图 3

3. 根据单相故障只跳开故障相，两相或三相故障跳开三相的要求，不同类型的故障对保护的动作时间有一定影响。在单相接地故障时，如故障电压相位在 90° 附近，方向元件可在 $1 \sim 2$ 毫秒内判定故障，当故障电压相位在电压过零或过零前某一角度，由于电流缓慢升起，方向元件的动作时间可能延长 $4 \sim 5$ 毫秒，在两相接地故障时，如有一相故障电压相位在电压过零或过零前某一角度，则该相方向元件延迟动作，使跳开三相的时间增大。两相短路和三相短路均能保证快速跳开三相。

4. 对极性比较式行波方向保护的大量计算分析结果表明，在线路内部故障时，故障分量的电压电流异极性的持续时间在 $0.3 \sim 9$ 毫秒之间，判定最初的极性是极性比较式行波方向保护正确动作的关键。

5. 值得注意的几个特殊问题：

(1) 在图 1 (b) 所示系统的 1 和 3 节点内部发生 A、B 两相接地短路时，如故障发生在 A 相电压过零，则出现 A 相电压和电流的极性相同的情况，如图 4 所示，这时 A 相

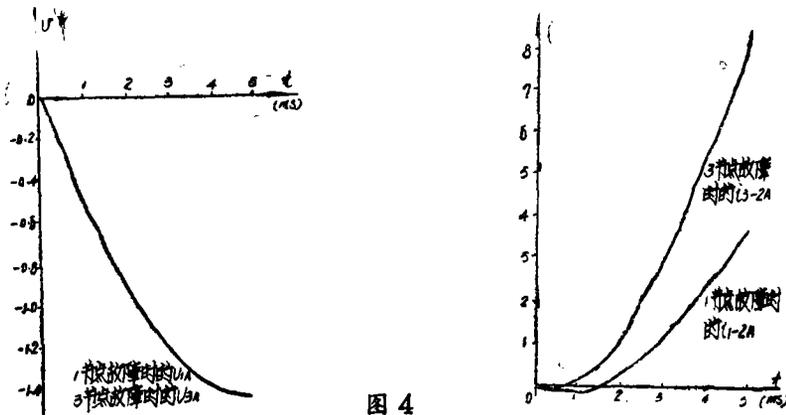


图 4

误判断为外部故障，将保护闭锁。这种错误极性关系的出现并不意味着行波原理存在问题，而是因为在1和3节点的系统侧只接有集中参数的变压器。在发生A、B两相接地短路时，由于A相电压过零，A相电流由零缓慢增大，而B相电压在短路瞬间较大，其值为 $|U_m \sin 120^\circ|$ ，因此，B相电流由零增大较快，于是在变压器互感的作用下，便短时出现了A相电流和电压同极性的情况。计算结果表明，错误极性的持续时间在1节点为1.5毫秒，在3节点为0.8毫秒。错误极性时的电流值较小，可用不大的“门坎”定值躲过。

(2) 环网(图1、c)的计算结果表明极性比较式行波方向载波保护能正确判定线路内、外部故障，但是图5所示的情况却必须给予足够的重视。图5是在图1(c)

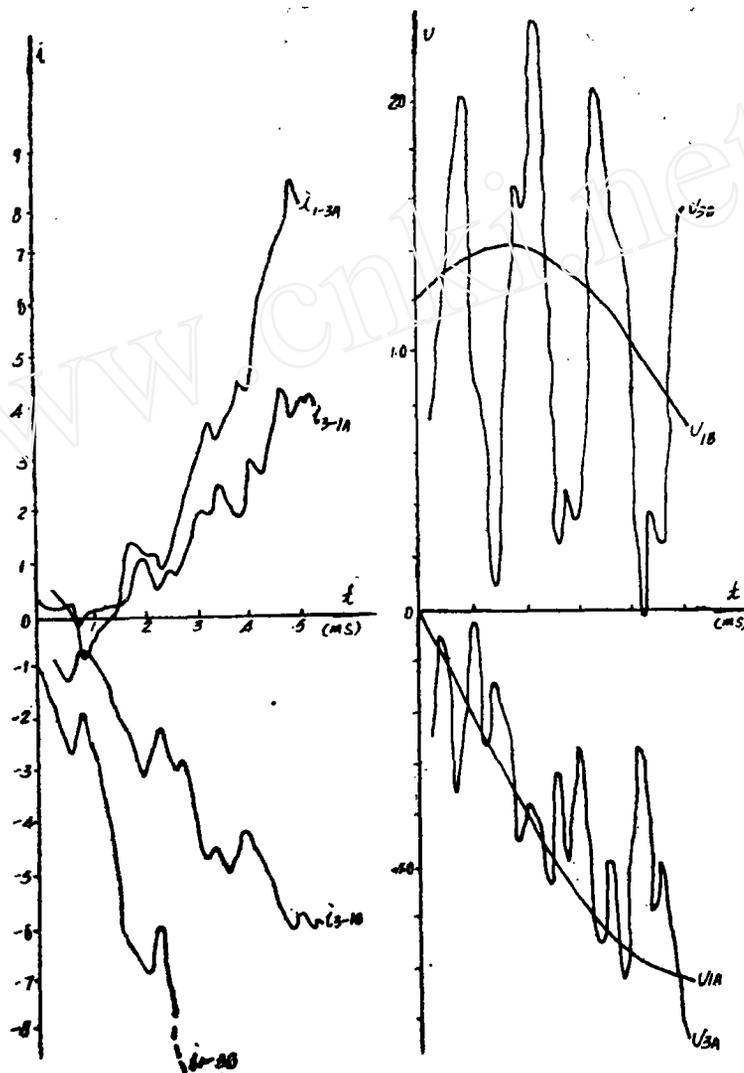


图 5

中1节点线路1—3的内侧在A相电压过零时发生A、B两相接地时的故障分量电压和电流的波形。由图可见，线路1—3两端的电流、电压的初始极性均相异，可正确判定为线路内部故障。但是，应该指出，1节点侧A相电流在正确极性期间的幅值很小，紧跟而来的极性变反后的电流幅值又较大，如果处理不当就会出现误判断。在这种情况下，单纯用提高电流门坎的方法将与灵敏度的要求产生矛盾，而用电压和电流门坎配合的方法是可行的。

上述现象是由于A相电流初值很小，而环网线路又较短而出现的。这种现象也会在单回线联接的母线上有其它出线时出现。当出线较长时，反射较迟产生或振荡频率较低，情况会有所改善。

(3) 分支线路(图1(d))又有环网存在时会出现分支线路内部故障时判定为外部故障的情况，如图6中波形所示。图6是在图1(d)中2节点分支线内部发生A、B、C三相接地短路，A相电压相位为 90° 时计算的。由波形可见，分支线3节点的三相电压、电流均为同极性，判定为反向故障，闭锁分支线保护。同样的情况也可能在分支线内部故障时在2节点出现，这种情况的出现也可用行波原理说明。

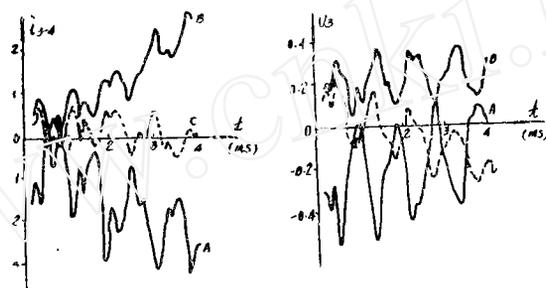


图 6

二、非故障相

我国在超高压输电线路照例采用单相自动重合闸。当极性比较式行波方向保护按相装设时，不仅要分析故障相，而且也要分析非故障相保护的動作情况。

在三相输电线路发生故障时，由于有相间互容和互感存在，非故障相也同样出现电压波与电流波，其幅值大小及波形与故障相位、类型及系统参数等因素有关，情况比故障相更为复杂。通过分析计算，可说明如下：

1. 在单相接地故障时，非故障相的电流幅值较故障相小，在三相线路完全对称的条件下，非故障两相的电压和电流完全相同，如图2，a虚线所示；在两相短路时非故障相电流为零；在两相接地短路时，非故障相电流比单相接地时显著增大。

2. 计算分析结果表明，在单相和两相接地故障时，无论故障发生在线路内部或外部，故障线路两端的非故障相的故障分量电压、电流的初始极性均会出现相异的情况，判定为线路内部故障，图7为其一例。图7为线路1—2在1端外侧(图1(b))发生A、B两相接地时C相的电流电压，故障时A相电压相位为 90° 。在故障瞬间，非故障相

的电压的极性由故障相决定。在单相接地时，故障端非故障相的电压的初始极性与故障点所加电压极性相同，这是因为故障相电压通过电容耦合完全决定了非故障相电压。同理，在两相接地短路时，非故障相的电压的初始极性则与故障相中瞬时值最大者的极性相同，此后，由于互感等因素的影响使电压极性改变。非故障相的电流极性则由于互感的作用与线路中故障相电流的初始极性相反。

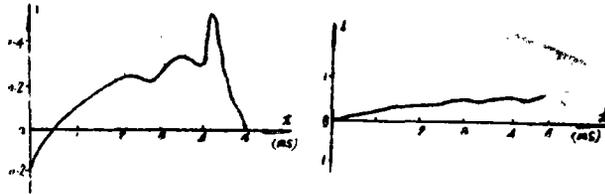


图 7

信号选择及通道配置

与常规的方向载波保护一样，极性比较式行波方向保护也可按闭锁信号或允许信号原理构成。由于后者在动作原理上有其特点，且动作速度很快，故有必要对信号选择及通道配置问题予以讨论。

一、信号的选择

下面从保护的動作速度、動作可靠性和通道可靠性几个方面对闭锁信号和允许信号进行比较

1. 动作速度

当采用闭锁信号时，在外部故障时为了防止保护误动，行波方向正方向动作的一端应延时 t_D 发出跳闸脉冲。延时 t_D 应按下式计算

$$t_D = t_T + t_R + t_{BJ} + \Delta t$$

式中： t_T —发讯延时；

t_R —收讯延时；

t_{BJ} —闭锁继电器动作延时；

Δt —裕度时间。

图 8 中示出外部故障时两端动作时间的配合。图中 t_{wm}^+ 为 m 端行波方向元件正向动作时间， t_{wn}^- 为 n 端行波方向元件反向动作时间。由图可见，由于信号传送时间可认为与行波传送时间相等，故在延时 t_D 中不再计入信号传送延时的因素。当取 $t_T + t_R = 5$ 毫秒， $t_{BJ} = 1$ 毫秒， $\Delta t = 1.5$ 毫秒时，则 $t_D = 7.5$ 毫秒。

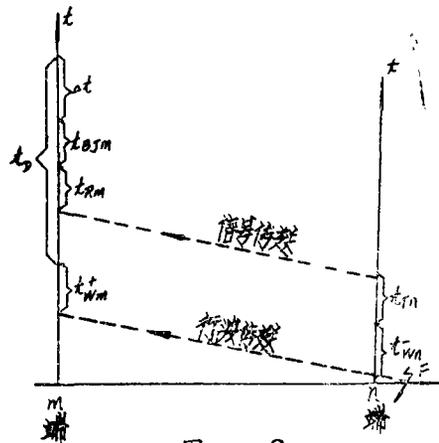


图 8

在靠近n端内部(图8)发生故障时,令m、n两端保护动作时间为 t_{mB} 和 t_{nB} ,信号传送延时时为 t_x ,则

$$t_{nB} = t_{Wn}^+ + t_D$$

$$t_{mB} = t_{Wm}^+ + t_x + t_D$$

设 $t_{Wm}^+ = t_{Wn}^+ = 1$ 毫秒, $t_x = 1$ 毫秒, $t_D = 7.5$ 毫秒,可得

$$t_{nB} = 8.5 \text{ 毫秒}, \quad t_{mB} = 9.5 \text{ 毫秒}$$

显然,线路两端保护的行动时间与内部故障点的位置有关,故线路两端采用闭锁信号的极性比较式行波方向载波保护的行动时间特性如图9中虚线所示。

当采用允许信号时,两端保护行动时间无需配合,在靠近n端内部故障时,令线路m、n两端的行动时间为 t_{mP} 和 t_{nP} ,由图10可见,当故障发生在线路n端内侧时,设

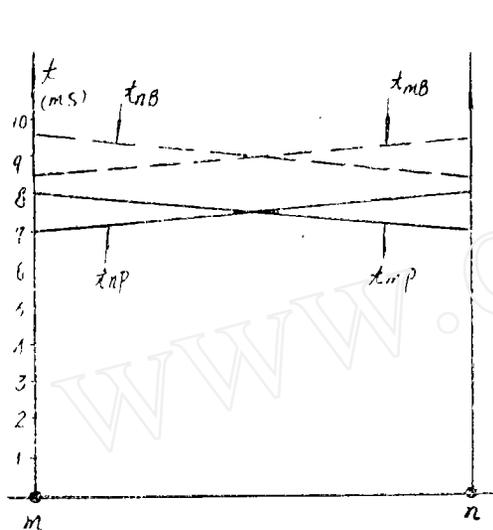


图 9

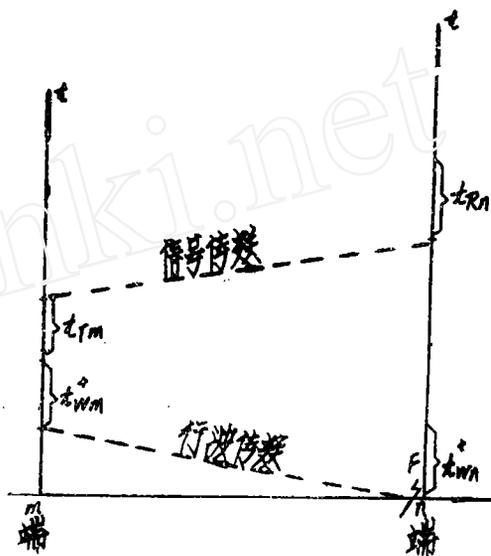


图 10

$t_{Wm}^+ = t_{Wn}^+ = t_W^+$, 两端的行动时间分别为

$$t_{mP} = t_W^+ + t_x + t_T + t_R$$

$$t_{nP} = t_W^+ + 2t_x + t_T + t_R$$

将前述 t_W^+ 、 t_x 和 $t_T + t_R$ 之值代入可得

$$t_{mP} = 7 \text{ 毫秒}, \quad t_{nP} = 8 \text{ 毫秒}$$

同理,在靠近m端内侧发生故障时有

$$t_{nP} = 7 \text{ 毫秒}, \quad t_{mP} = 8 \text{ 毫秒}$$

采用允许信号的极性比较式行波方向保护的行动时间特性如图9实线所示。

由上述可知

(1) 在长度小于300公里的线路上,采用允许信号的行动速度较闭锁信号快。随

着线路的增长, t_r 变大, 但 t_D 不变, 闭锁信号保护的動作速度有可能比允许信号时的動作速度快。

(2) 由图 9 还可看出, 采用允许信号, 远离故障点一端的保护動作速度较快; 采用闭锁信号时, 近故障点一端的保护動作较快。

2. 動作可靠性及灵敏度

采用闭锁信号时保护有较高的動作可靠性, 采用允许信号时保护有较高的防止误動的可靠性的一般性结论在此仍然适用。鉴于在超高压线路上电压互感器均装设在线路侧, 在空载合闸到故障线路时, 无论采用闭锁信号或允许信号保护都将拒动, 故二者情况相同, 但允许信号不要求两端方向元件的灵敏度配合, 故更为有利。

二、通道的配置

当极性比较式行波方向元件分相装设时, 可以三相合用一个收发讯机, 也可以三相分别有各自的收发讯机。在三相合用一个收发讯机时, 通道最为简单、经济, 其缺点是外部单相接地短路时即将三相保护同时闭锁, 如果紧接着又发生线路内部故障, 保护将拒绝動作。在三相各设有单独的收发讯机时, 占用通道较多且不经济, 但在上述情况下, 保护仍能切除故障。

从通道的可靠性看, 与常规载波保护相同, 故障起动作发讯时闭锁讯号只沿非故障线路传送, 在长期发讯时允许信号具有同上的性质, 此外, 通道还可处于经常监视状态^[2]; 在采用移频方式时, 通道也处于经常监视状态, 故障可能引起通道中断的问题可用逻辑判断得到解决^[4]。

选 相 问 题

如所周知, 在采用综合重合闸的条件下, 单相接地时跳开单相, 其它故障时跳开三相。因此, 选相的主要问题是单相接地故障时能正确地选出故障相。而选出故障相的关键在于正确区分故障相与非故障相。大量计算的分析表明, 故障时的电流分量是可以很好利用的一个因素。下面对极性比较式行波方向载波保护的几种选相方案进行讨论。

一、设电流“门坎”选相

这种方法是根据在单相接地故障时, 故障相和非故障相的电流幅值有较大差别的特点提出的。在采用这种方法时, 应对非故障相的幅值进行计算, 然后设定电流“门坎”值, 以保证单相接地故障时非故障相可靠不动。

这种方法的主要优点是简单, 但是必须对非故障相的电流幅值进行计算, 否则不能保证选相; 另一方面, 由于必须避过非故障相的电流幅值, 就可能出现故障相在某些运行方式下灵敏度不足的困难。一般情况下, 按保证保护灵敏度设置电流“门坎”时, 虽不能保证可靠选相, 但可作为一种简单的选相辅助措施。

二、用电流幅值比较法选相

这种方法也是基于单相接地故障时，故障相电流幅值大于非故障相的特点提出的。但与上述方法不同，这里采用了“相对比较”的方法，解决了灵敏度与选相之间的矛盾。其基本原理可用图11表示。图中三相故障分量电流 I_{ag} 、 I_{bg} 、 I_{cg} 加于最大值输出回路，其中的最大者除以2设为 I_m ，再与 I_{ag} 、 I_{bg} 、 I_{cg} 分别进行比较，当 I_{ag} 、 I_{bg} 或 I_{cg} 大于 I_m 时，该比较器有输出，即判定该相为故障相。计算分析结果表明，非故障相的电流幅值小于故障相电流幅值的一半，因此选相作用可以得到保证。

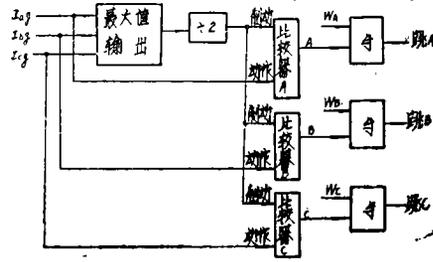
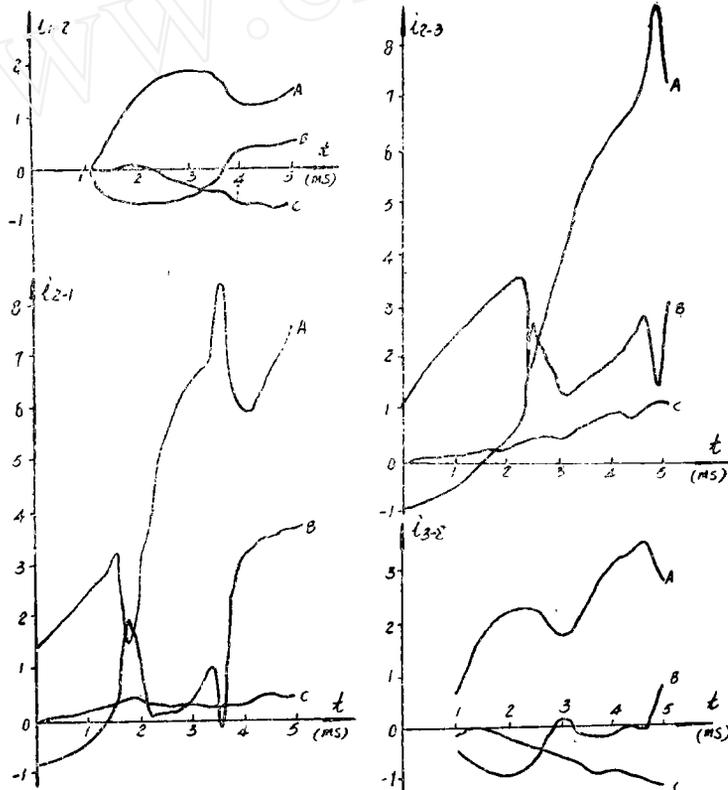


图 11

为了不影响保护的動作速度，上述幅值比较应在瞬时值的条件下进行，对于单相接地短路，由于故障相的电流恒大于其 $1/2$ ，因此故障相的比较器的输出是无延时的，对于三相对称短路，因 $I_{ag} + I_{bg} + I_{cg} = 0$ ，其中任何一相电流的瞬时值都等于其它两相电流瞬时值的代数和，因此后两相电流瞬时值的最大值不会低于前一相的一半。由此可见，在三相短路时，

除电流大的一相的比较器有输出外，另外必定至少还有一相的比较器有输出，这就可以保证不影响三相短路时的保护动作时间；对于两相短路，故障两相的电流瞬时值相等，两相比较器均有输出，保护能快速跳三相。

在两相接地短路时，非故障相的电流幅值小，该相比较器无输出，接地故障两相的电流值的相对大小则与故障相位有关，在不利的故障相位条件下，将给保护的三相跳闸带来延时。图12给出了在图1(b)中的2节点两侧内



(a) 故障相位 $\alpha_A = 90^\circ$

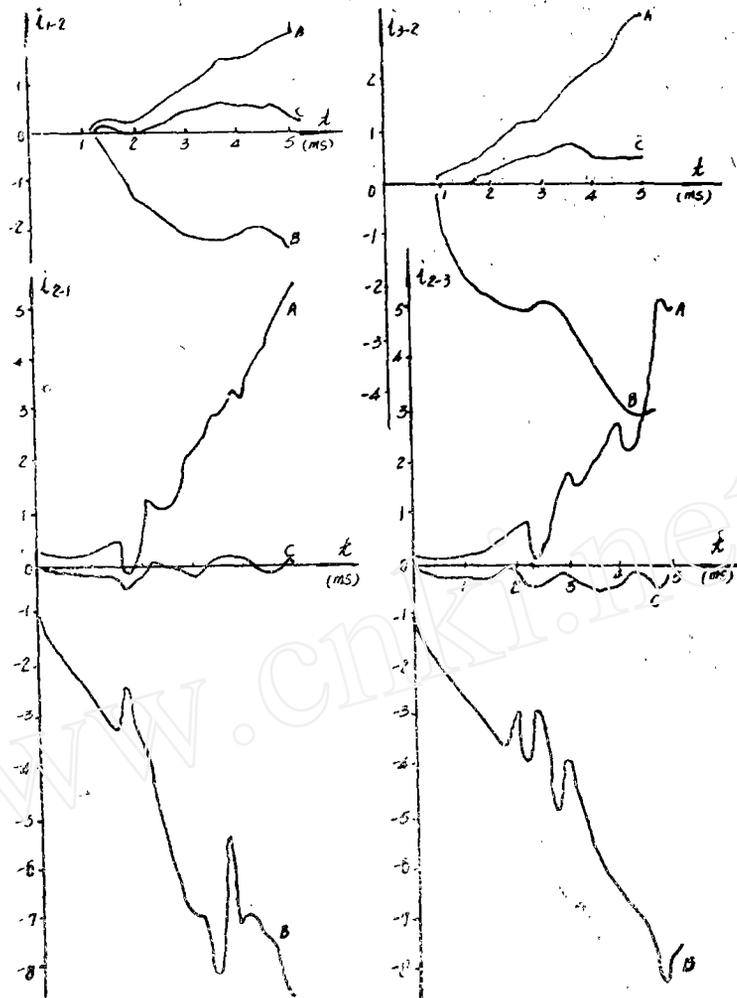


图12 (b)故障相位 $\alpha_A = 0^\circ$

发生两相接地短路时线路1—2和2—3两端的三相电流波形，由图可见，这种选相元件将给三相跳闸造成延时，其值可达4~5毫秒。还需指出，为了保证选相的动作稳定性，应在比较器的输出端设置记忆回路。

三、电流差选相

电流差选相的原理基于在三相线路上发生单相接地短路时非故障两相的电流相等或相差较小的特点。用电流差选相早已提出，并作成选相脉冲继电器^[5]。我国在用电流差突变选相方面作了大量工作，并已用于电力系统中。

将电流差选相用于极性比较式行波方向载波保护中时的原理框图如图13所示，按照图示逻辑关系，在单相接地时只跳开故障相，在其它类型的短路时要跳三相时，必须使

三个电流差，即 $i_{ag}-i_{bg}$ ， $i_{bg}-i_{cg}$ ， $i_{cg}-i_{ag}$ ，均有输出。当三相线路对称性较好时，差值后的门坎定值较小，反之，门坎值较大。

对于三相短路，由于三相电压相位各相差 120° ，无论在何时时刻发生故障时，三个电流差均较大，可保证跳三相；两相短路时也无问题。在两相接地短路时，比较严重的情况出现在故障中的一相处于过零前的某一时刻。这时，非故障相电流可能和此故障相的电流非常接近，如其差值达不到设定的门坎值，将引起保护延时跳开三相。图14中给出了在图1(b)所示的2节点两侧内发生A、B两相接地时，其中A相在电压过零前 30° 时的线路两端电流波形。

当三相线路不对称大时， $I_{ag}-I_{cg}$ 如小于定值，则会引起三相跳闸延时，如三相不对称小，则无问题。

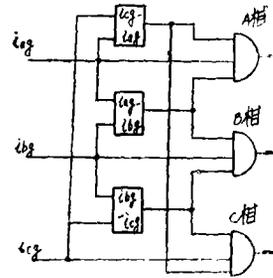


图 13

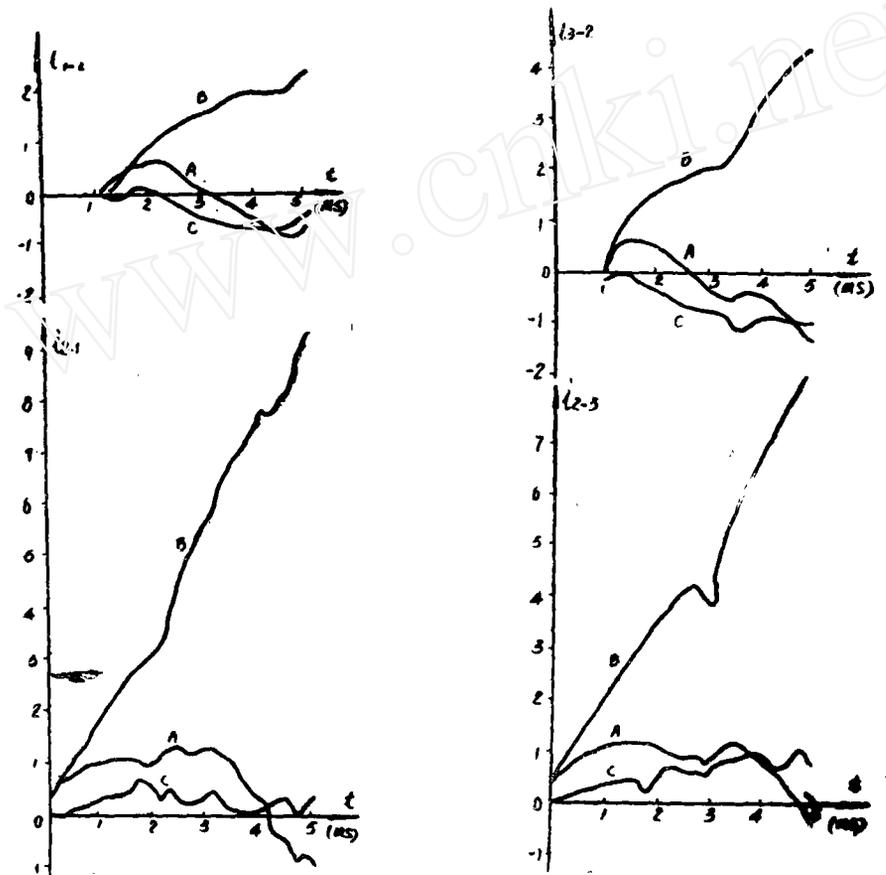


图14

合闸到故障的检测

在超高压线路上，电压互感器通常装设在线路侧，理论分析表明，空载合闸到故障线路上时，极性比较式行波方向载波保护拒绝动作。我们所作的大量计算也证实了这一结论。

为了保证空载合闸时能快速切除合上的故障线路，可另设“合闸到故障检测器”。

“合闸到故障检测器”应满足以下主要要求：

1. 空载合闸时，线路无故障，不动作；
2. 空载合闸时，线路有故障，可靠动作；
3. 线路一端已合闸，另一端合闸时，不应动作；
4. 正常运行条件下，系统发生故障时不动作。

符合上述要求的“合闸到故障检测器”有以下两种方法：

一、鉴幅法⁽¹⁾

这种方案是根据空载合闸时有无故障时的电压、电流的幅值特点设计的，由此可做出图15所示的原理框图。为了反应各种短路，检测器应每相单独装设，图中 V 、 I 为相电压和电流， I_g 为相电流的故障分量。为了判定线路是否处于空载合闸条件，取电流定值 $I_{DZ} = 0.2I_{fn}$ （ I_{fn} —线路负荷电流），取电压定值 V_{DZ} 大于空载合闸在线路末端短路时，合闸端的最大残压；当 V 、 I 小于上述定值时动作。 I_g 的定值由方向元件的要求决定。时间元件 $0/t_1$ 在电流由小变大时延时 t_1 秒返回，其作用为保证空载合闸到故障线路上时，检测器能可靠跳闸。 $t_2/0$ 在电压由大变小时延时 t_2 秒动作，其作用是与 t_1 配合以使检测器在线路空载运行时发生外部故障时不会误动，为此应满足 $t_2 > t_1$ ，根据上述作用的要求，可取 $t_1 = 70$ 毫秒， $t_2 = 80$ 毫秒。时间元件 t_3 的作用是保证空载合闸时电压的建立，以防止线路无故障时可能误动，根据这个要求，考虑最不利的合闸相位，应取 $t_3 > 10$ 毫秒。

鉴幅式“合闸到故障检测器”可反应各种线路故障，并且当合闸到无故障线路上时，可靠不动，并能满足对“合到故障检测器”提出的各项要求，在空载合闸时系统发生谐振也不会误动。在电压互感器断线后又发生线路故障，检测器可能误动，故应有电压断线闭锁措施。这种检测器的缺点是动作时间较长。

二、鉴频法

鉴频法是根据合闸电流的频率区别线路有或无故障的。一般情况下，空载合闸时线

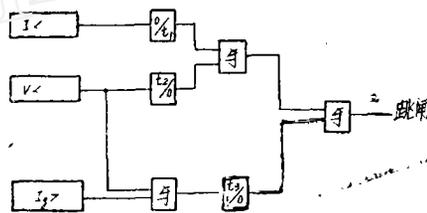


图 15

路无故障，电流频率较高，线路有故障，电流频率较低，利用鉴别电流波过零的时间的方法可以实现频率鉴别。

在我们对这种方法的探讨中发现，只用鉴别电流频率来实现“合闸到故障检测器”是有困难的，主要原因是超高压线路在空载合闸时会出现谐波谐振，奇次谐波谐振的频率较高，对鉴频法不会带来显著影响，偶次谐波谐振的频率可小于100赫，给鉴频法带来困难。我国实际500千伏的静模试验证实了这种谐振的可能。

根据空载合闸电流频率的特点和防止谐波谐振可能产生的误动，鉴频式“合闸到故障检测器”可如图16所示。图中各相电流首先通过“门坎”先从电流幅值上加以区别，

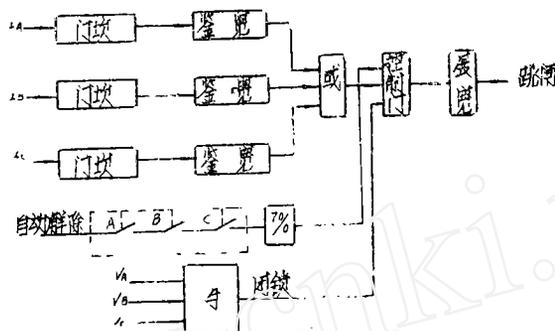


图 16

只有空载合闸时电流幅值大于“门坎”值后才进行鉴宽。这种做法是利用了故障电流较空载合闸电流大的特点以使用鉴宽把二者更好地区别开来。当空载合闸时，线路无故障时超过“门坎”的宽度很小，小于鉴宽定值，不作用于跳闸；线路有故障时，电流超过“门坎”的宽度足以使鉴宽输出，作用于跳闸。鉴宽定值可取为5—6毫秒。为了防止以载合闸时发生谐振使检测器误动，由三相电压经过与门对鉴宽输出进行闭锁。图中A、B、C为三相断路器的辅助接点，当三相开关合上后经过70毫秒将检测器退出工作，空防止外部故障时误动。鉴频式“合闸到故障检测器”能满足正确动作的要求，动作速度有所提高。

结 论

一、对极性比较式行波方向载波保护的极性分析表明，利用故障分量的最初极性能正确区分线路内、外部故障。这种极性关系完全与行波分析结果相符。

二、极性比较式行波方向载波保护与常规方向载波保护一样，在特殊结构的分支线上应用时会出现分支线内部故障时保护拒动的问题。

三、在极性比较式行波方向元件分相装设的条件下，用设电流门坎选相可能遇到选择性与灵敏度的困难。用电流幅值比较法选相可以克服上述困难，但在两相接地短路时

会给三相跳闸带来延迟。在不对称性不大的三相线路上采用电流差法选相是较好的。

四、极性比较式行波方向载波保护可按闭锁信号或允许信号原理构成。从动作速度和可靠性指标来看，允许信号更为有利。

五、“合闸到故障检测器”可用鉴幅法或鉴频法构成，二者均能满足要求，初步分析结果表明，鉴频法有可能提高动作速度。

〔参考文献〕

1. Estergalyos and oth. "The Development And Operation Of An Ultra High Speed Relaying System For EHV Transmission Line" 27th CIGRE, 1978 N0 34—04

2. 葛耀中“超高压输电线路的高频保护和微波保护——原理和应用”，继电保护研究班讲义，1981、2。

3. 吴国瑜，田又涵“用贝瑞隆法计算电力系统暂态过程——行波保护的计算方法与程序设计”，西安交大科技报告81—068。

4. "Applied Protective Relaying" Westinghouse Electric Corporation Relay-Instrument Division, 1976.

5. Б·М·Пятигорский "Пусковое Фазомыриательное Импульсное Реле" Энергетика, Выпуск 4, 1961.