

电力系统故障引入行波初始极性分析的新方法

山东工业大学 潘贞存 王广延

提 要

本文根据行波传播理论和模变换理论,提出了一种分析多相电力系统故障时,故障引入行波电压、电流的初始极性的新方法。导出了两种典型的系统结构情况下发生各种故障时的数学模型,编制了计算程序,并利用计算的结果对极性比较式方向行波保护的動作情况进行了分析,证明了该保护動作判据的正确性。

一 引 言

自从第一套行波保护装置在一九七六年投入运行以来,行波保护得到了迅速发展。目前世界上许多超高压输电线路已采用了行波保护。极性比较式方向行波保护具有结构简单、動作速度极高等特点,应用最为广泛。因此,对这种保护装置的构成原理和動作判据作进一步的分析、计算,提出准确而简单的分析方法是十分必要的。

极性比较式方向行波保护是通过判断故障所引入的行波电压、电流的初始极性来确定故障方向的。当保护安装处的行波电压、电流的初始极性相反时,确定为正方向故障;当它们的初始极性相同时,确定为反方向故障。这种保护仅反映故障后行波的第一个波头的极性,与其后的变化无关。

过去在论述极性比较式方向行波保护的工作原理时,对初始极性的分析是以单相系统为依据的,并且没有考虑实际的系统结构和运行方式。^[1]但在实际的三相系统中,各相之间存在着电的(分布电容)和磁的(互感)联系,系统故障时,任一相的电压、电流都要受其他相的影响,所以仅用单相系统来分析是不全面的,所得出的结论是不严格的。贝瑞隆法^[2]等电磁暂态计算的方法,虽能用来分析三相系统中的初始极性问题,但其数学模型复杂,计算机计算较长,应用不够方便。

(1) 随极化电压的增大,圆半径缩小,圆心上移。

(2) 偏移阻抗特性圆的灵敏角不变,正方向整定值不变。

(3) 随极化电压的不同,偏移阻抗特性圆成一组内切圆。其偏移度随极化电压的增大而减小。

(4) 为了使偏移度的要求不变,在加入极化电压后,应调整 Z_{I1} 和 Z_{I2} 值,使之同原来的特性圆一致。

注:关于(4)点,可根据“正方向整定值不变和偏移度不变”这两个条件,结合前述导出的有关公式,推算出重新调整后的偏移圆的参数(Z_{I1}' 和 Z_{I2}'),使之在加入极化后与要求的特性圆一致(Z_{I1} 和 Z_{I2})。这里就不再述了,只写出结论:

$$Z_{I1}' = (1 + K) Z_{I1} - K Z_{I2} \quad Z_{I2}' = (1 + K) Z_{I2} - K Z_{I1}$$

本文根据行波传播理论和模变换理论，提出了一种分析三相电力系统故障时，故障引入的行波电压、电流的初始极性的新方法。并用它对两个典型的系统结构进行了计算分析。

二、初始极性分析法的原理与数学模型的推导

根据迭加原理，电力系统发生故障时，故障后系统中各点的电压、电流可以看作有两部分组成，一部分为故障前的稳态分量，它可以看成是由系统的电源产生的。另一部分为故障迭加分量（即故障引入的行波分量），它可以看成是由加于故障点的虚构电压源产生的。行波保护利用故障引入的行波分量作为保护的测量信号，因此，分析其动作行为时，仅分析故障迭加分量即可。

对图 1 (a) 所示的输电线路，当 F 点发生故障时，对故障迭加分量来说，相当于在该点处的故障相上突然加上一个与该相故障前电压大小相等、相位相反的虚构电压源，它所产生的响应，以行波的形式向故障点的两侧传播，现以 A 相单相接地故障为例，分析故障行波的传播过程。在 A 相单相接地故障情况下，故障点的迭加状态如图 1 (b) 所示，设故障前 F 点的 A 相电压为：

$$V_{f, a}(t) = -V_m \sin(\omega t + \phi)$$

则故障后故障点相域的约束条件为：

$$\left. \begin{aligned} V_a(t) &= -V_{f, a}(t) = V_m \sin(\omega t + \phi) \\ i_b(t) &= 0 \\ i_c(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

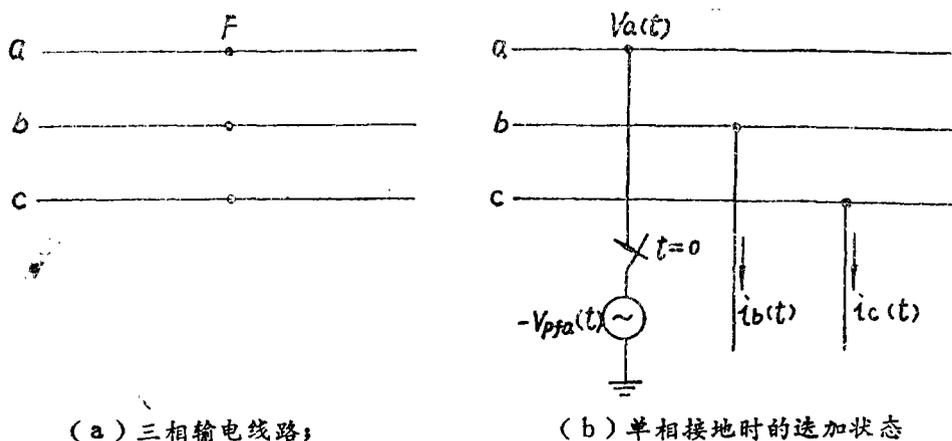


图 1 故障点的故障迭加状态

利用模变换法⁽⁴⁾，可以把 (1) 式变换成模域的约束条件。

若取karanbauer变换,即取下式所示的变换矩阵:

$$[Q] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} \quad [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

代入(1)式中,可以得到(3)式所示的模域的约束条件。

$$\left. \begin{aligned} i_0 - i_a &= 0 \\ i_0 - i_\beta &= 0 \\ V_0 + V_a + V_\beta &= V_a(t) = V_m \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设故障发生在 $t = -\tau$ 时刻, τ 为行波从故障点传播到保护安装处所需的时间,则在 $-\tau < t < \tau$ 时间内,故障点仅存在向保护安装处方向传播的行波,这时故障点各模行波电压、电流之间的关系可由(4)式给出:

$$\left. \begin{aligned} V_0 - Z_0 \cdot i_0 &= 0 \\ V_a - Z_a \cdot i_a &= 0 \\ V_\beta - Z_\beta \cdot i_\beta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 Z_0 、 Z_a 、 Z_β 分别为线路的0、 α 、 β 模波阻抗,对三相平衡系统来说, $Z_a = Z_\beta$ 。

将(3)、(4)两式进行联立,就可以解出A相单相接地故障情况下, $-\tau < t < \tau$ 时间内故障点的边界条件:

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \frac{Z_0}{Z_x} V_a \\ V_a &= \frac{Z_a}{Z_x} V_a \\ V_\beta &= -\frac{Z_\beta}{Z_x} V_a \\ i_0 = i_a = i_\beta &= -\frac{V_a}{Z_x} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $Z_x = Z_0 + Z_a + Z_\beta$

0、 α 、 β 三个模量在输电线路各自传播、互不影响,因此,在故障点模域边界条件求出后,各模系统可以分别求解,各模求解方法基本一致。若不考虑各模行波传播的时间差,则对无损线来说,在行波到达继电器安装处后 2τ 的时间内,该处的入射波电压和入射波电流分别为^[3]:

$$\left. \begin{aligned}
 V_{0,i} &= V_0(t-\tau) = \frac{Z_0}{Z_\Sigma} V_s(t-\tau) \\
 V_{s,i} &= V_s(t-\tau) = \frac{Z_s}{Z_\Sigma} V_s(t-\tau) \\
 V_{R,i} &= V_R(t-\tau) = \frac{Z_R}{Z_\Sigma} V_s(t-\tau) \\
 i_{0,i} &= i_{s,i} = i_{R,i} = -\frac{V_s(t-\tau)}{Z_\Sigma}
 \end{aligned} \right\} (6)$$

在入射波到达继电器安装点后，由于出现了阻抗不连续点，要发生反射。继电器所测量到的行波电压和电流实际上是入射波和反射波的迭加，而不是单纯的入射波。因此，分析保护的動作行为，还应求出反射波，并与入射波迭加，求出总的行波电压和电流。

对于不同的系统结构，入射波在阻抗不连续点处所遇到的波阻抗的性质和大小都是不同的，在该点的反射波情况也是不同的，下面以图2(a)所示的典型系统结构为例来进行讨论。

该系统结构在保护安装处的母线上，不仅有集中参数元件，而且还有其它出线。

在F点发生故障时，故障行波传到母线R后，将会有一部分行波折射到母线R所连接的其他线路上去，在这些线路上引起向对侧传播的行波，且在到达对侧的母线后，又产生一个传向母线R的反射波，在这个反射波传到R母线之前，R母线所连的各非故障线路上仅存在单方向的行波（正向波），这时，它们的存在对故障线路的影响相当于在母线R上并联一个与其波阻抗相等的等值阻抗。在无损耗线路的情况下，该等值阻抗呈纯电阻性质。所以这种情况下对故障线路的故障迭加分量来说，母线R背后的系统可以用图2(b)所表示的等值电路来代替。

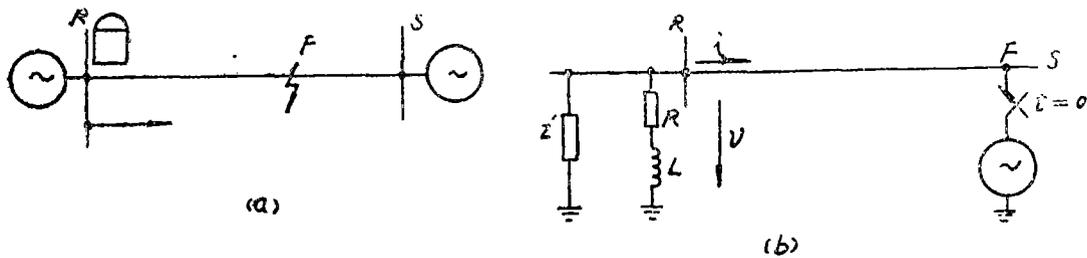


图2 系统结构及R侧等值电路
(a) 系统结构 (b) 等值电路

由图可见，从R母线看进去的R侧系统的运算形式的阻抗为：

$$Z_{xx}(s) = \frac{Z'_x \cdot (R_x + sL_x)}{Z'_x + R_x + sL_x} \quad (7)$$

式中 $X = 0, \alpha, \beta$ 分别代表 $0, \alpha, \beta$ 模。

线路RS上发生故障时, 保护安装处的零模反射波电压、电流的运算形式如下:

$$V_{0r}(S) = V_{0i}(S) \left(\frac{Z_{0R}(S) - Z_0}{Z_{0R}(S) + Z_0} \right) \quad (8)$$

$$i_{0r}(S) = i_{0i}(S) \left(\frac{Z_0 - Z_{0R}(S)}{Z_{0R}(S) + Z_0} \right)$$

α 、 β 模反射电压、电流的运算表达式与式(8)类似, 只要把0相应地换成 α 、 β 即可, (以下同)。所以继电器安装处的零模行波电压、电流的运算形式分别为:

$$V_{0fR}(S) = V_{0i}(S) + V_{0r}(S) = 2 V_{0i}(S) \cdot Z_{0R}(S) / (Z_0 + Z_{0R}(S)) \quad (9)$$

$$i_{0fR}(S) = i_{0i}(S) + i_{0r}(S) = -2 V_{0i}(S) / (Z_0 + Z_{0R}(S))$$

将(7)式代入(9)式中, 并令:

$$k_{10} = \frac{2Z'_0}{Z'_0 + Z_0};$$

$$k_{20} = \frac{Z'_0 R_0 + Z'_0 \cdot Z_0 + R_0 \cdot Z_0}{L_0 \cdot Z_0 + L_0 \cdot Z'_0};$$

$$k_{30} = \frac{R_0}{L_0} - k_{20};$$

$$k_{40} = \frac{R_0}{L_0} + \frac{Z'_0}{L_0} - k_{20};$$

$$G_0 = \frac{2}{Z'_0 + Z_0}$$

可以得到:

$$V_{0fR}(S) = k_{10} \left(1 + \frac{k_{30}}{S + k_{20}} \right) \cdot V_{0i}(S) \quad (10)$$

$$i_{0fR}(S) = G_0 \left(1 + \frac{k_{40}}{S + k_{20}} \right) \cdot V_{0i}(S)$$

将(6)式代入(10)式中, 并利用卷积定理求拉氏反变换, 可以得到:

$$V_{0fR}(t) = k_{10} \cdot V_{0m} \sin(\omega t + \phi) + \frac{k_{10} \cdot k_{30} V_{0m}}{k_{20}^2 + \omega^2} \left[k_{20} \sin(\omega t + \phi) - \omega \cos(\omega t + \phi) - e^{-k_{20}t} (k_{20} \sin \phi - \omega \cos \phi) \right] \quad (11)$$

$$i_{0fR}(t) = -G_0 \cdot V_{0m} \sin(\omega t + \phi) + \frac{G_0 k_{40} V_{0m}}{k_{20}^2 + \omega^2} \left[k_{20} \sin(\omega t + \phi) - \omega \cos(\omega t + \phi) - e^{-k_{20}t} (k_{20} \sin \phi - \omega \cos \phi) \right] \quad (12)$$

式中 $V_{0m} = \frac{Z_0}{Z_x} \cdot V_x$

如前说明, α 、 β 模的行波电压、电流的表达式与式(11)、(12)类似, 只是把零相应地换成 α 、 β 。

在各模行波电压、电流求出后, 利用模反变换, 将它们进行组合, 就可以得到各相

行波电压和电流值。

$$\left. \begin{aligned} V_{afR}(t) &= V_{ofR}(t) + V_{afR}(t) + V_{bfR}(t) \\ V_{bfR}(t) &= V_{ofR}(t) - 2V_{afR}(t) + V_{bfR}(t) \\ V_{cfR}(t) &= V_{ofR}(t) + V_{afR}(t) - 2V_{bfR}(t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{afR}(t) &= i_{ofR}(t) + i_{afR}(t) + i_{bfR}(t) \\ i_{bfR}(t) &= i_{ofR}(t) - 2i_{afR}(t) + i_{bfR}(t) \\ i_{cfR}(t) &= i_{ofR}(t) + i_{afR}(t) - 2i_{bfR}(t) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

利用同样的办法，我们可以导出其他故障情况下，各模及各相行波电压、电流的表达式。

三 计算结果分析

根据利用上述办法导出的、各种类型的故障情况下的数学模型，我们编制出了计算程序，对各种不同的故障初始角度下发生各种类型的故障时的情况进行了大量的计算，绘出了这些情况下保护安装处各相行波电压值和电流值，作出了相应的曲线。图3是在故障初始角度为 0° 、 90° 和 150° 情况下，A相单相故障时，保护安装处各相行波电压、电流的波形图。

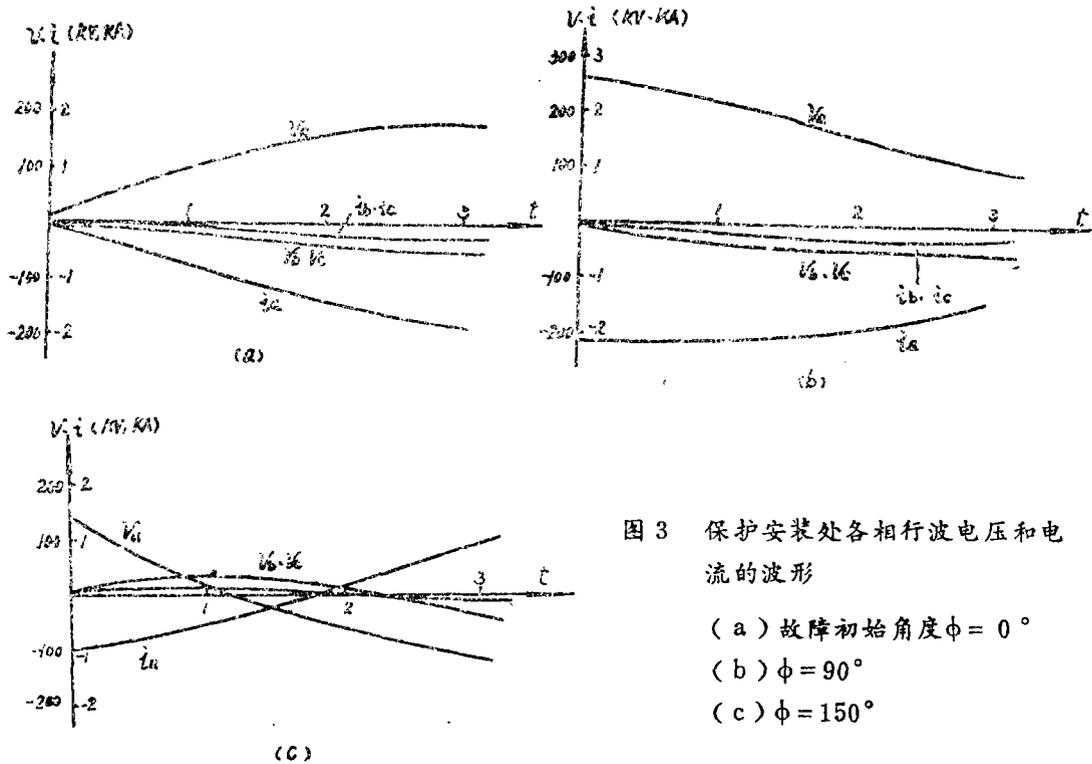


图3 保护安装处各相行波电压和电流的波形

- (a) 故障初始角度 $\phi = 0^\circ$
- (b) $\phi = 90^\circ$
- (c) $\phi = 150^\circ$

根据上述计算的结果,我们可以得到下面四点结论:

1、在各种不同的初始角度下,保护区正向发生各种类型的故障时,故障相的行波电压、电流的初始极性总是相异的。即故障相的继电器在短路后的瞬间总可以正确地判断故障的方向。非故障相的行波电压、电流有可能同极性,但其幅值较小,不会抢先闭锁保护。

2、利用上述的办法,本文还对被保护线路所连接的母线上仅有集中参数元件的系统结构情况进行了计算,计算的结果表明:不同的系统结构情况下,故障以后,故障相行波电压值、电流值有很大的差别,对端部仅有集中参数元件的系统结构,行波电压的幅值很大(约为正常相电压的两倍),而电流由零缓慢升起,不会出现突变。出现这种情况的原因是由于集中电感中的电流不能突变,它对第一个行波的波头来说,相当于开路,所以电压、电流行波的反射系数分别为+1和-1,故在行波到达后瞬间,保护装置处的行波电压、电流分别为:

$$V_{fR} = V_{iR} + V_{rR} = 2V_{iR}; \quad I_{fR} = i_{iR} + i_{rR} = 0$$

对图2所示的系统结构,故障时保护安装处的行波电压和行波电流都会出现突变,但电压的幅值要比上一种系统结构小得多,并且所连接线路越多,电压幅值就越小。电流的幅值要比上一种系统结构大。

3、两种系统结构下,在电压过零短路时,保护安装处的行波电压、电流由零缓慢增大,要经过一定时间才能到达整定值。使动作时间增加。

4、从上面的分析我们还可以看到,在进行电力系统的电磁暂态计算时,所选取的系统模型应尽量接近实际情况,而不能象稳态计算那样,首先把系统简化成双端电源的辐射网络,然后计算。在系统比较复杂时,至少应对所研究的线路两端的母线上所连接的元件用实际的模型来表示。

四 结束语

本文所提出的初始极性分析的新方法,克服了单相系统分析法的局限性,与其他的电力系统电磁暂态计算的方法相比,它具有物理意义明确、数学模型简单等特点,特别是这种方法的计算机计算时间比其他电磁暂态计算的方法大大减少,约为贝瑞隆法计算机计算时间的1/10。

作者利用本文所提出的方法和贝瑞隆法对同一系统模型进行了对比计算,两种方法所得到的初始极性的数字计算是完全一致的。

五 参考文献

1. M.Chamia, S.Liberman: "Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines—Development Design, and Application." IEEE Trans.Vol.PAS-97, No.6, 1978, P2104-2112.
2. H.W.Dommel: "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks." IEEE Trans.Vol.PAS-88,

简化的 CVT 暂态模拟

水电部南京自动化研究所 管柏龄

提 要

由于电容式电压互感器(以下简称CVT)的暂态过程,可能导致快速保护超范围动作或者拒动,特别是短线尤为严重。因此,研究在系统故障时,CVT的过渡过程以及这种过渡过程对继电保护的影响显得十分必要。本文阐述了“简化的CVT暂态模拟”的等效电路、参数的选择、暂态波形以及对零序电抗继电器的考核试验等等。经过多年来的反复试验表明,这种模拟方法简单易行,可作为科研及生产上考核CVT暂态特性对继电保护动作行为影响的一种试验手段。

一、概 述

电容式电压互感器在我国已经广泛应用于110kV~500kV高压电力系统中,在国外也普遍采用,其原因是它比电磁式电压互感器(以下简称为P、T)有一定的优越性:主要表现在经济上价格低,而且随电压等级越高这个优点越明显。另外,CVT可兼作通讯和高频保护用的耦合电容。此外,CVT为油密封瓷套式,绝缘可靠性高。但是,CVT的分压电容器的贮能及其释能的时间常数大,使CVT的次级电压不能迅速真实地跟随初级电压的变化,这是它的一个很突出的缺点。过去对于低速保护CVT的暂态特性的有害性不突出,而对于高速保护CVT的暂态过程就可能引起保护超范围动作或者拒动。为了研究CVT的过渡过程以及这种过渡过程对继电保护的影响,首先要进行CVT的模拟。在几年以前我们所已经在这方面做了不少工作,并在静(动)模上建立了CVT模拟来考核继电保护。早在1981年我们在研制集成电路距离保护时,研制工作总是从单元件着手,试验是在单相低电压下进行的。为了考核CVT暂态过程对测量元

No.4, April 1969, P388-399.

3. L.V.Beley: "Travelling wave on Transmission System." John Wiley Press, and edition, 1951.

4. L.M.Wedepohl: "Multiconductor Transmission Lines.Theory of Natural Modes and Fourier Integral Applied to Transient Analysis." Proc.IEE, Vol.116, No.9, Sept.1969, P1553-1563.