

西门子 7SD 光纤纵差保护的新原理

赵可非，张激，何锋锁

(西门子电力自动化有限公司，南京 江苏 211100)

摘要：近些年来，光纤纵差保护以其原理简单、性能可靠的优点在高压、超高压输电线路中逐步得到广泛的应用。本文介绍了西门子 7SD 光纤纵差保护中所采用的一种新型差动保护算法，该算法可根据实际的差动电流和预期的测量误差对制动电流进行自适应调整。

关键词：光纤纵差保护；自适应制动电流；7SD

New Principle of Siemens 7SD Line Differential Relay

ZHAO Ke-fei, ZHANG Ji, HE Feng-suo

(Siemens Power Automation Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Over the past years, the line differential relays have found wide applications in the area of HV and UHV. In this paper, a new principle of Siemens 7SD line differential relay is introduced. This new line differential protection algorithm can adjust the relay restraint current self-adaptively, depending on the actual differential current and expected measurement errors.

KEY WORDS: Line differential relay; Adaptive restraint current; 7SD

中图分类号： 文献标识码： 文章编号：

1. 引言

光纤纵差保护的应用问题随着电力网络复杂性的增加而不断增多，传统的线路差动保护的问题是：被保护对象复杂性的不断增加通常要求保护大幅降低灵敏度。例如，如果电流互感器在可能出现区内或区外故障的情况下达到饱和状态，就必须采用更高的制动电流，防止在区外故障时保护误动作。本文针对上述问题，以西门子 7SD 光纤纵差保护为基础，对于其特有的自适应制动电流的原理给予了详细的分析。

2. 线路差动保护原理

根据典型的电流差动保护原理，图 1 中线路两侧电流向量之和的绝对值被定义为差动电流，

$I_{\text{差动}} = \left| \dot{I}_A + \dot{I}_B \right|$ 。而这两个电流的绝对值之和则被定义为制动电流， $I_{\text{制动}} = \left| \dot{I}_A \right| + \left| \dot{I}_B \right|$ 。

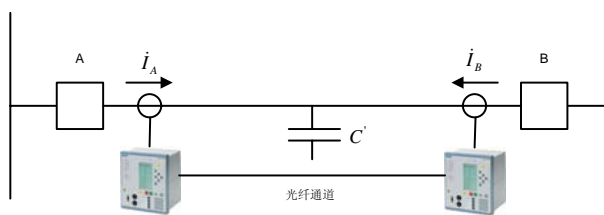


图 1：线路差动保护原理图

Fig.1 Illustrative Diagram of Line Differential Protection

如图 2 所示，纵差保护的典型动作特性由二部分组成：即无制动部分 1 和有制动部分 2 和 3。在正常负载条件下或者出现外部故障时，保护的工作点保持在制动区内，如果出现内部故障，差动

电流就会增加并将继电器的工作点移动到动作区。

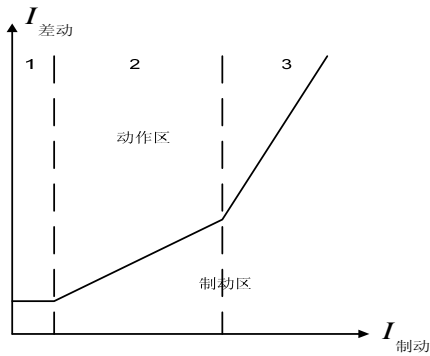


图 2: 差动保护的典型差动曲线

Fig.2 Classical Trip Characteristic of Differential Relay

如果是没有测量和数据传输误差的理想系统，则图 1 中基波电流 I_A 和 I_B 的相量值相等，保证了在受保护线路上没有故障时不存在差动电流。然而，理想的系统是不存在的，电流互感器是造成测量误差的罪魁祸首。以下将探讨线路差动保护系统中所涉及的重要误差源，而这些误差源将可能引起差动电流。所述保护的主要原理在于找出所有这些误差源，然后通过精确设置来调整保护的動作行为，从而使保护灵敏度保持在尽可能高的水平。与此不同，增加制动区虽然也能解决这一问题从而避免受到误差源的影响，但是它会使得保护的灵敏度大大降低。

3. 测量误差源

3.1. 电流互感器的准确度

即使一次电流 I_A 和 I_B 相等而且电流互感器处于线性范围内，即不处于饱和状态，线路两端的保护所测量到的电流还是有差异的，引起偏差的来源主要是电流互感器的误差。

3.2. 电流互感器饱和

电流互感器可能会出现饱和状态，饱和的程度取决于电流互感器的类型及其负荷。电流互感器饱和可能会进而引起差动保护对测量数据的错误判断。例如，如果线路一端的电流互感器处于饱和状态，而线路另一端的电流互感器不处于饱和状态，则在出现区外故障时会识别为区内故障。

3.3. 时间同步

输电线路两端的电流相量只有在采样数据的窗口属于同一时间帧时才可以进行比较。也就是说，输电线路两端计算的电流相量必须属于相同的绝对时间。例如，即使线路两端所测得的电流幅值完全相同，在不同时间计算的相量也可能不同。7SD5 通过自动测量线路两端时钟的时间差及数据传输时间（通道延迟时间）来实现线路两端时钟的精确同步，后面将详细探讨所采用的时间同步原理。

3.4. 数据传输延迟时间的不稳定性

线路两端时钟的同步只有在数据传输时间（通道延迟时间）保持不变时才能实现。然而有些数字通信网络的通信延迟时间非常不稳定，不可能实现两端保护时钟的同步。在上述情况下，正确的做法是采用具有精确时间标记性能的全球定位系统(GPS)。

3.5. 稳态电容性充电电流

线路电容引起的电流（如图 1 所示）是造成差流的另一个来源。在稳态情形下，该电容电流是可以被计算出来的：

$$I_C = 2\pi f C'_B l \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

C'_B ...线路电容，单位 nF/km

l线路长度

V线电压

根据公式(1)，电容电流完全可以得到补偿。

3.6. 瞬态电容性充电电流

在图 1 中断路器 A 或 B 合闸后的一段时间内，瞬态电容性电流可能大大高于稳态电容性电流。因此，保护必须能够自动检测到断路器合闸，同时必须启动相应的校正算法。

3.7. 电力系统频率偏移

如果电力系统频率不完全与标称值相符，采用傅里叶分析方法或类似算法计算电流相量就会引起测量误差，因此而引起的差流必须进行补偿。

3.8. 其他影响

还有一些其他的测量误差源，例如，被保护区域内电力变压器或并联电抗器的励磁电流。必

须根据这些误差源的类型自动调整保护的制动电流，从而避免保护的误动。

4. 新电流差动比较原理

无论测定值的实际状况如何，图 2 所示的线路差动保护的差动曲线只设置一次并保持不变。这就意味着，无论电流互感器是否处于饱和状态，无论是否出现所有其他测量误差，继电器的两个斜坡均保持不变。该特性的缺点是它必须涵盖最糟糕情况下的所有测量误差。这就是说，保护在各种运行状态下都远达不到其本应具备的灵敏度，这些因素使新型线路差动保护的设计面临了挑战。下文将介绍经过长期现场检验的能够对制动电流做自适应调整的新电流差动比较原理，该原理的核心是充分利用电力系统数据，从而使保护的灵敏度保持在尽可能高的水平。

所述保 7SD 的制动电流包括以下几个独立分量：

$$I_{RT} = I_{DP} + \delta I \quad (2)$$

$$\delta I = \delta I_{CT} + \delta I_{SI} + \delta I_{SY} + \delta I_{OT} \quad (3)$$

等式 (2)，(3) 表明 7SD 的制动电流有五个独立分量：

I_{DP} 是保护的起动值，如果差动电流低于该值，则保护不起动，

δI_{CT} 用于补偿因电流互感器不准确(电流互感器误差)而引起的差动电流，

δI_{ST} 用于补偿因电流互感器饱和导致波形畸变而引起的差动电流，

δI_{SY} 用于补偿因同步误差和通讯不稳定而引起的差动电流，

δI_{OT} 用于补偿上文中所述的其他误差源。

如图 3 中所示，根据测定值的实际情况独立计算线路两端每台保护的制动电流分量 δI ，然后比较这些制动电流分量。每台保护的五个不同的制动电流分量均为标量值，而差动电流则通过相量值 I_A 和 I_B 来计算。因此，必须将差动电流 I_{Diff} 与两台保护的的制动电流之和进行比较。

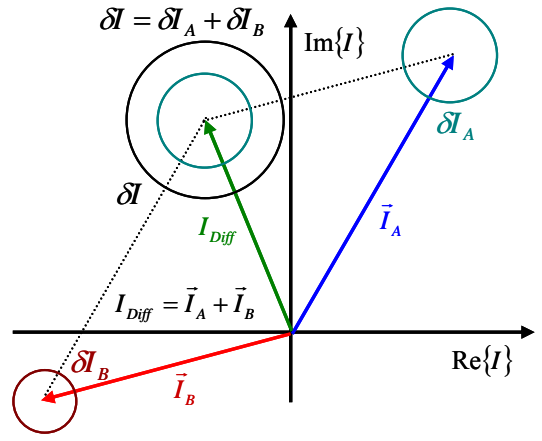


图 3：差动和制动电流的计算原理

Fig.3 Illustrative Diagram of New Principle to Calculate Restraint and Differential Current

由于单根曲线无法显示制动电流连续调整的特性，因此，通过图 4 中的简易差动/制动电流图来表征所述保护的运行特性，具体采用一条将动作区和制动区分割开来的 45° 线来表征。

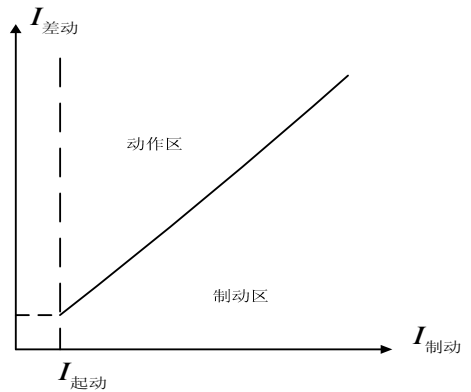


图 4：带有自适应制动电流的差动保护的差动曲线
Fig.4 Trip Characteristic with Self-adaptive Restraint Current of Differential Relay

以下详细论述不同制动电流分量的计算：

a. 电流互感器准确度因素：为了给 δI_{CT} 绘制一条精确的曲线，必须计算相应电流互感器的运行时的准确限值系数。运行时的准确限值系数 n' 与额定准确限制系数 n 的商定义了参数 P_1 ：

$$\frac{n'}{n} = \frac{P_N + P_i}{P' + P_i}$$

n' 运行时的准确限值系数，

n 额定准确限值系数，

P_N 处于额定电流时电流互感器的额定负载，

P_i 处于额定电流时电流互感器的内部负载，

P' 处于额定电流时实际连接的负载。

电流互感器的额定准确限值系数 n 和额定功率 P 通常会标注在电流互感器的铭牌上，电流互感器的内部负载会在试验报告中给出，如果内部负载未知，可通过次级绕组的直流电阻 R_i 算出来， n/n' 是电流互感器准确度发生转变时的值。

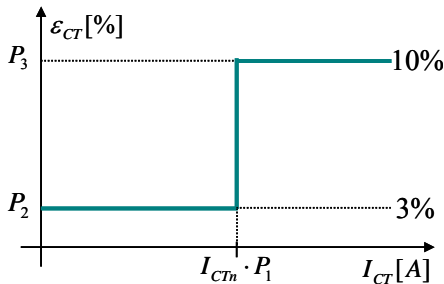


图 5：电流互感器准确度极限
Fig.5 CT accuracy limits

图 5 给出的是 600A/5A 的 5P20 型电流互感器的一个示例。考虑到差动保护的二次回路负载以及保护本身的负载，电流互感器负载为 20VA。P₁、P₂ 和 P₃ 的设置可参考[1]和[2]。输入这些定值后，保护将根据测得的实际电流在内部计算电流 δI_{CT} ，如图 6 所示。

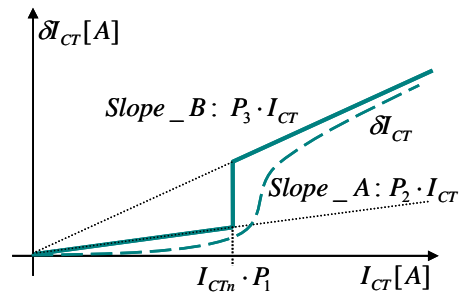


图 6：作为继电器电流函数的 δI_{CT}
Fig.6 δI_{CT} as a function of the relay current

b. 电流互感器饱和因素：如图 2 所示，在典型的差动保护中，差动特性曲线的第二段折线考虑了电流互感器的饱和效应。该原理的缺点在于假定在差动电流移动到图 2 中的第 3 区时电流互感器将处于饱和状态。但是，饱和效应取决于铁心的实际通量，同时还依赖于电流互感器的运行时的准确限值系数 n' 。因此，通过测量来检测电流互感器饱和是更好的做法。如要完成上述操作，如图 7 所示，保护将测量电流曲线的波形及其相对于正弦曲线的偏移。根据偏移的等级，调整制动电流的量。制动电流的这种自适应调整算法将会把保护的灵敏度保持在尽可能高的水平，即使在电流互感器饱和效应下也是如此。

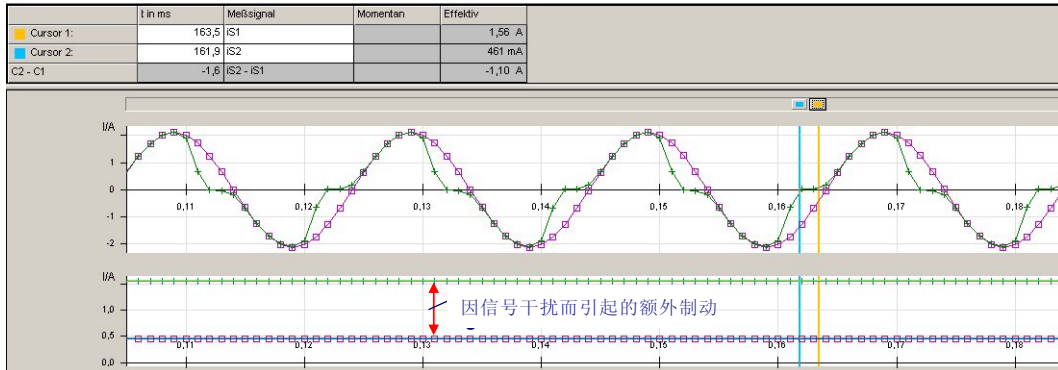


图 7：电流互感器饱和时保护测量的和计算的电流波形图
Fig.7 Visualization of the measured and calculated line current in case of CT saturation using the disturbance recording function of the relay

c. 同步误差因素：在大多数应用中，从 A 到 B 的通信通道延迟时间等于从 B 到 A 的通信通道延迟时间，保持不变。如图 8 所示，如果这一特性始终存在，则保护的本地时钟就可以精确同步。

因为本地时钟不同步，所以保护 A 和 B 的本地时间之间有一个差值 D 。保护 A 在处于自己的本地时间 t_1 时发送信号。保护 B 接收到该信号并

记录本地时间 t_2 。考虑到不同位置的时间差 D 以及从 A 到 B 的信息传输时间 ΔT_1 ：

$$t_2 = t_1 + D + \Delta T_1$$

保护 B 经过一段延迟时间后在本地时间 t_3 时将相同的信号发送给继电器 A， $t_3 = t_2 + \delta$ 。

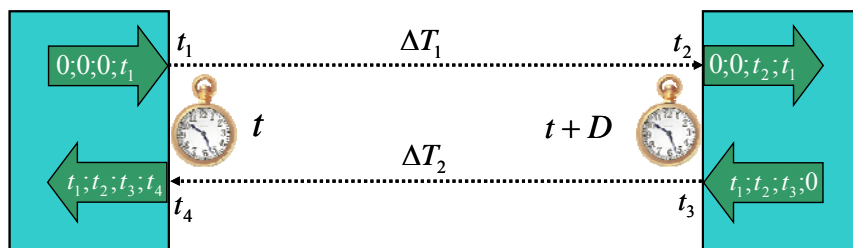


图 8: 为计算时间差和通信信道延迟而进行的两台保护之间的信息交换
Fig.8 Information exchange between two relays for the calculation of time difference and communication channel delay

保护 A 接收到该信号并记录本地时间 t_4 ，考虑到两个时钟的时间差 D 以及从 B 到 A 的信息传输时间 ΔT_2 ：

$$t_4 = t_3 - D + \Delta T_2$$

这样，通过以下等式就可以计算出时钟间的时间差以及信息交换延迟时间：

$$T_A = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

$$T_B = (t_2 - t_1) - (t_4 - t_3) = 2D + \Delta T_1 - \Delta T_2$$

假定从 A 到 B 的信息传输时间等于从 B 到 A 的信息传输时间，就可以作出解答：

$$\Delta T = \Delta T_1 = \Delta T_2$$

$$\Delta T = T_A/2$$

$$D = T_B/2$$

本文中所论述的线路差动保护每四分之一周期测算一次通道延迟时间。因此，可以立即检测出每一次通道延迟时间相对前一次延迟时间的偏移，测得的时间同步准确度较高，约为 $5\mu s$ ，这样就可以准确比较在线路两端计算的相量。调试期间，必须测定通道延迟时间的最大起伏，同时必须输入相应的定值，保护根据参数计算相应的制动电流值。如果通道延迟时间突然改变，例如通过另一个通信通道重新设定信号路径而引起延迟时间突然改变，保护将立即检测到这种新情况；如果通道延迟时间超过相应的定值，保护将闭锁线路差动保护。在极少的应用中，利用数字通信网络数据交换时，发送和接收延迟时间既不相等也不一致。在这种情况下，延迟时间不稳定的问题通过 GPS 接收器得以解决。计算所得的电流相量标记的时间为 GPS 信号的绝对时间，这样就消除了延迟时间不稳定所造成的所有负面影响。

5. 新电流差动比较原理的优势

和传统的差动保护特性相比，7SD 差动特性最大的进步就是对每一个误差源分别进行了独立的计算。对于线路两侧 CT 特性不同而引起的一侧 CT 先于另一侧 CT 饱和的情况，7SD 的差动保护特性将具有十分明显的优势。而且，传统的差动特性曲线来源于过去的电磁式继电器，其第二段折线最初的目的也是为了抑制 CT 饱和。然而进一步的研究结果和故障录波数据显示，即使小于两倍的 CT 额定电流（外部故障并且衰减系数很大），CT 也有可能饱和。为了克服该问题，传统的差动特性曲线在正常运行时不得降低灵敏度。因此，在内部故障短路电流较小（高阻接地故障）的情况下，传统的差动保护往往存在着盲区而不能动作。下面将用一个算例对 7SD 的差动特性和传统的差动特性加以说明，系统模型及 CT 参数如图 9 所示。

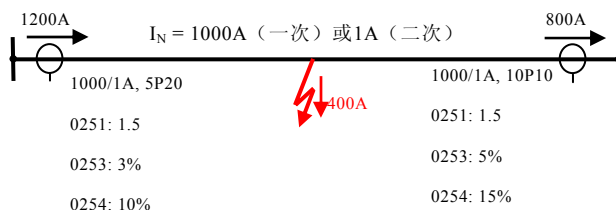


图 9: 系统模型及 CT 参数

Fig.3 Illustrative Diagram of Power System and CT Parameters

差动电流计算如下：

$$I_{Diff} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2| = |1.2A + (-0.8)| = 0.4A \quad (4)$$

7SD 的制动电流计算如下：

$$\begin{aligned} \Delta I_{Rest} &= I_{Diff} + \varepsilon_{CT1} \cdot |I_1| + \varepsilon_{CT2} \cdot |I_2| \\ &= 0.2 + 0.03 \cdot 1.2 + 0.05 \cdot 0.8 = 0.276A \end{aligned} \quad (5)$$

传统差动保护的制动电流计算如下：

$$I_{Rest} = |I_1| + |I_2| = 1.2 + 0.8 = 2.0A \quad (6)$$

从式（5），（6）可以看出，与传统差动保护特性相比，7SD 具有很高的灵敏度，从而保证在线路内部故障短路电流很小（高阻接地故障）时保护能够可靠动作。

6. 结论

本文论述了西门子 7SD 光纤纵差保护的新原理，该线路差动保护功能的重要不同之处在于它将实际的测量和通讯等误差相加作为制动电流并可以自适应调整，因此具有非常高的灵敏性和可靠性，尤其对区内经高阻接地故障，具有很强的抗过渡电阻能力。现已投放市场多年，并在北京，南京地铁，攀钢，宝钢以及内蒙古 500kV 电网等个项目中得到了成功的应用。从长期的运行经验及使用结果表明，内部故障时该保护动作迅速灵敏度高，外部故障时具有很高的稳定性。

参考文献

- [1] G. Ziegler: "Numerical Differential Protection" ISBN 3-89578-234-3.
 [2] Instruction manual SIPROTEC 7SD52/53 Line Differential and Distance Protection.

收稿日期：2008-XX-XX

作者简介：

赵可非（1975-），男，硕士，西门子电力自动化有限公司高压线路保护产品经理。Email：kefei.zhao@siemens.com。

张激（1969-），男，多年从事变电站综合自动化及保护应用。Email：ji.zhang@siemens.com。

何锋锁（1976-），男，西门子电力自动化有限公司现场服务工程师，参与了内蒙古 500kV 电网 7SD5 的安装调试工作。Email：fengsuo.he@siemens.com。