

# 三端系统数字式分相电流差动 保护跳闸判据研究

华北电力学院 王绪昭 杨明玉 杨奇逊

**摘 要** 本文提出一组适用于三端系统的数字式分相电流差动保护跳闸判据, 这组判据在故障后采取按条件分时切换投入方式, 既保证了区内短路动作的灵敏性, 又具有较高的区外短路防卫能力, 与传统判据相比, 新判据在反应有电流流出的内部故障时, 也具有较高的灵敏度。

**关键词** 微机保护 三端系统 电流差动 跳闸判据

## 1 三端系统的特殊问题和几种传统判据

与两端系统相比, 三端系统电流差动保护会遇到两个特殊问题。

第一 区外短路时, 某侧 CT 将流过其他两侧短路电流之和, 这个 CT 有严重饱和的可能。

第二 三端系统有可能发生内部故障, 而某侧电流流出现象, 见图 1。

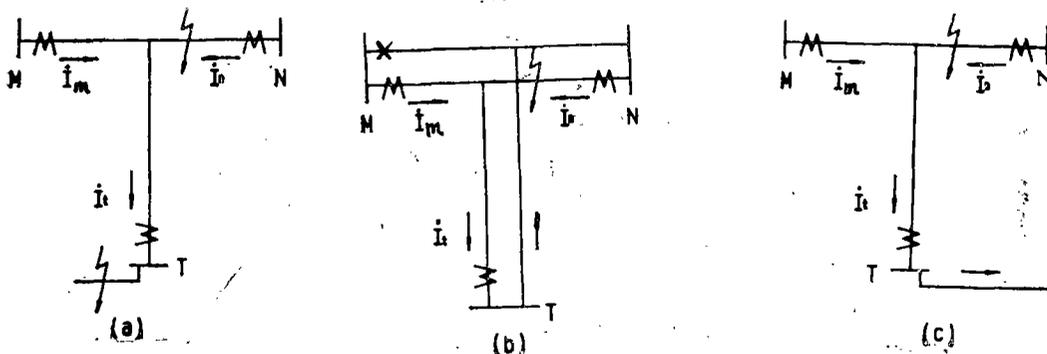


图 1 几种典型的三端系统网络图

由于上述两个问题, 国内外曾提出过各种有针对性的动作判据<sup>(1)</sup>, 代表性的有如下三种。

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > K_1 (|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n| + |\dot{I}_t|) + K_0 \quad (1)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > (K_1) (|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n| + |\dot{I}_t| - I_X)^+ + K_0 \quad (2)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > K_1 (|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n| + |\dot{I}_t|) + K_2 (|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n| + |\dot{I}_t| - I_X)^+ + K_0 \quad (3)$$

式中  $K_1, K_2$ : 制动系数,  $K_3, K_0$ : 定值

$(X)^+$ : 当  $(X)^+ \leq 0$  时  $(X)^+ = 0$ ,

$$(X)^+ > 0 \text{ 时 } (X)^+ = X$$

我国引进的日本东芝公司数字微波电流差动保护的動作判据，是与(1)式形式相同的两个判别式<sup>(2)</sup>。依照 $K_0$ 、 $K_1$ 的不同，分大电流判据和小电流判据。两个判据的综合動作行为与(3)式基本相同。

英国GE C等欧洲电力公司多将(1)式分开为基本判据和差动判据，作为双端或多端系统电流差动保护的動作判据。这种判据在文献<sup>(8)</sup>中有较详细分析。

式(2)(3)的目的是提高内部故障电流流出时保护動作的灵敏度，同时在大电流量加大制动作用，以防区外短路时CT饱和而引起装置误动。式(3)的制动特性与動作特性见图(2)。图中折线拐点的位置取决于 $I_x$ 的大小。 $I_x$ 选取较大，使相对降低了区外故障的防卫能力。 $I_x$ 选得过小，将使内部短路时保护的灵敏度降低。

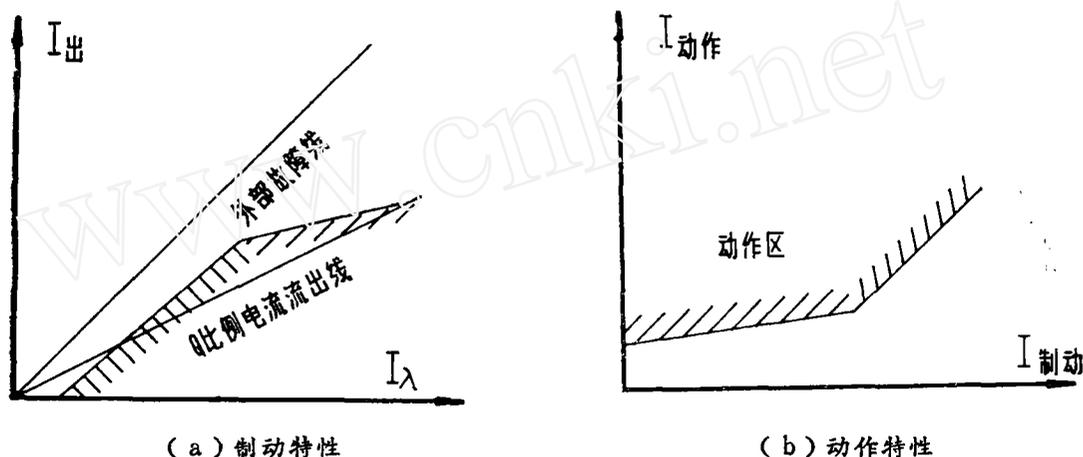


图2 式(3)运行特性

另外，上述传统判据用于微机保护时，计算量也是个值得考虑的问题，因(1)~(3)式都需要大量平方，开方运算，国外产品往往以采用高速16位或32位CPU和专用硬件电路来解决这个问题。

虽然上述传统判据尚有不完善之处，但若用于模拟式微波电流差动保护，这些判据是很有实用价值的。模拟式保护处于“静态”工作方式，而计算机保护属于“动态”工作方式。用计算机实现微波电流差动保护，有条件也有必要对传统判据进行改进，使之更趋于合理。

## 2 三端系统跳闸新判据

本文提出用于三端系统分相电流差动保护的几种跳闸判据之间的配合关系见图3。

(4)式是基本動作判据。定值 $I_0$ 按躲过线路电容电流整定，基本判据成立，软件才进入主判据——保守和两个灵敏判据，进行跳闸判断。

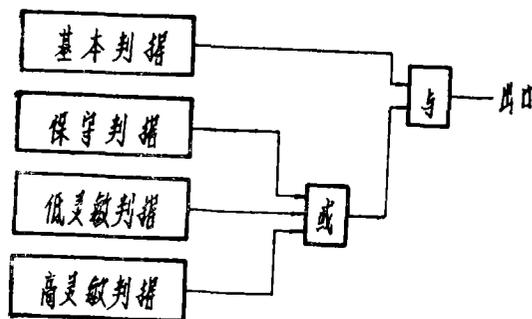


图3 跳闸判据工作配合关系示意图

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > I_0 \quad (4)$$

保守判据:

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (5)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_t| > |\dot{I}_m - \dot{I}_t| \quad (6)$$

$$|\dot{I}_n + \dot{I}_t| > |\dot{I}_n - \dot{I}_t| \quad (7)$$

以上三式同时满足时发跳令:

灵敏判据:

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > K |\dot{I}_{m \cdot n \cdot t} - \dot{I}_\Sigma| \quad (8)$$

其中  $\dot{I}_{m \cdot n \cdot t}$ : 三侧电流中幅值最大者,

$\dot{I}_\Sigma$ : 其余两侧电流之向量和。

(8) 式中  $K = 0.6$  为高灵敏判据,  $K = 1$  是低灵敏判据。 $\dot{I}_{m \cdot n \cdot t}$  的取得如下两式 (以 M 侧电流最大为例)。

$$|\dot{I}_m| > |\dot{I}_n| \quad (9)$$

$$|\dot{I}_m| > |\dot{I}_t| \quad (10)$$

以上各种判据中的向量值可由半周或整周富氏算法求得, 各判据若以下面的  $I_s$ 、 $I_c$  (电流向量的实、虚部) 形式写出, 计算量可得到明显的减少。

保守判据:

$$I_{ms} I_{ns} + I_{mc} I_{nc} > 0 \quad (11)$$

$$I_{ms} I_{ts} + I_{mc} I_{tc} > 0 \quad (12)$$

$$I_{ns} I_{ts} + I_{nc} I_{tc} > 0 \quad (13)$$

低灵敏判据:

$$I_{ms} I_{ns} + I_{ms} I_{ts} + I_{mc} I_{nc} + I_{mc} I_{tc} > 0 \quad (14)$$

高灵敏判据:

$$(4 I_{ms} + I_{ns} + I_{ts}) (I_{ms} + 4 I_{ns} + 4 I_{ts}) + (4 I_{mc} + I_{nc} + I_{tc}) (I_{mc} + 4 I_{nc} + 4 I_{tc}) > 0 \quad (15)$$

选择  $\dot{I}_{m \cdot n \cdot t}$  (以  $\dot{I}_m$  最大为例):

$$(I_{ms} + I_{ns}) (I_{ms} - I_{nt}) + (I_{mc} + I_{nc}) (I_{mc} - I_{nt}) > 0 \quad (16)$$

$$(I_{ms} + I_{ts}) (I_{ms} - I_{tt}) + (I_{mc} + I_{tc}) (I_{mc} - I_{tt}) > 0 \quad (17)$$

(11) ~ (17) 式的计算量不大, 即使用 8 位 CPU 实时处理也是不成问题的。

各判据间的工作配合关系后文将有论述。

### 3 新判据的运行特性分析

#### 3.1 制动与动作特性

保守判据是一种比相动作判据, 与各侧电流幅值大小无关。不难看出, 其动作条件是三

侧电流向量同时落在四分之一极坐标范围内。这种判据在区外短路时的防卫能力非常高，不会因 CT 严重饱和而误动。同时，大部分区内故障能满足动作条件，但不反映有电流流出的内部故障。

为分析方便，设灵敏判据中  $\dot{I}_{m..s} = \dot{I}_m$ ,

$\dot{I}_s = \dot{I}_p = \dot{I}_n + \dot{I}_l$ ，则式(8)可写为：

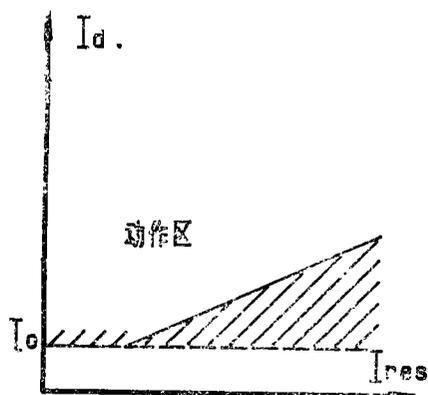
$$|\dot{I}_m + \dot{I}_p| > K |\dot{I}_m - \dot{I}_p| \quad (18)$$

上式与文献〔4〕中双端系统动作判据形式完全一样。区外故障时， $\dot{I}_{m..s}$ 与另两侧电流之向量和反相或接近反相，其制动特性与相位特性用流入流出电流方式来分析，与双端系统结论相同，此处不再重复分析。

$K = 0.6$ 时的高灵敏判据制动斜率与东芝公司判据在大电流域的制动斜率完全一致，新判据在全电流域具有这样的防卫能力。

但制动特性通常是在空载条件下区外短路做出的，如果负荷状态下区外故障，(8)式的制动电流小于传统判据中各侧电流幅值之和所形成的制动量。若取相同K值，新判据的防卫能力随着负荷分量的加重而低于传统判据。

然而本文所提方案包括三种判据，可以根据系统运行情况，自适应地改变跳闸判据。CT未饱和前，短时开放高灵敏判据。发现CT饱和，投入保守判据。其他情况下，使用低灵敏判据。无论在空载或负荷情况下发生区外故障，低灵敏判据的制动能力都高于传统判据的大电流域制动水平。因为应用传统判据时，制动系数K不会取为1，如东芝取为0.6，英国GEC取0.3。



$$\begin{aligned} I_a^2 &= I_m + I_n + I_l \\ I_{res} &= (I_m - I_n - I_l)K \end{aligned}$$

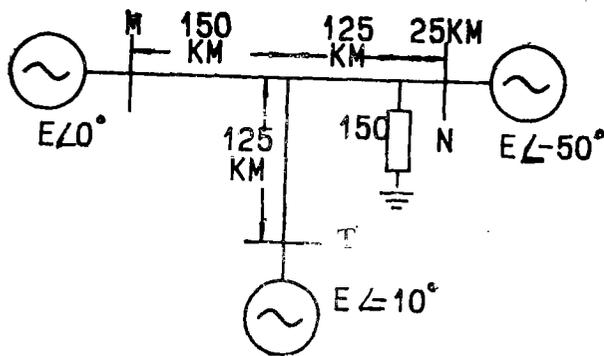
图4 灵敏判据动作特性

### 3.2 有电流流出的内部故障

图1中三种故障，(a)为内外部同时发生故障，情况罕见，可以不考虑。(b)与(c)的电流分布是一样的，现以图(c)空载下故障为例分析。

故障特点是  $|\dot{I}_l| < |\dot{I}_m|$  和  $|\dot{I}_l| < |\dot{I}_n|$ ， $|\dot{I}_m|$ 与 $|\dot{I}_n|$ 大小关系不定，因此 $|\dot{I}_{m..s}|$ 只能来自M或N侧。假设 $|\dot{I}_m| > |\dot{I}_n|$ 且两者同相位，则三侧电流之间的关系可写成

与传统判据相比，两种灵敏判据在区内短路时，都具有较高的灵敏度。观察(8)式，内部故障时，一般来说三侧电流相位比较接近。用较大一侧电流减去其他两侧电流而形成制动电流，可将制动量降到很低的程度。图4是灵敏判据的动作特性。与图2b不同的是，新判据的动作范围是变动的(如图中阴影部分)， $I_m = I_n + I_l$ 时动作最灵敏。 $I_m + I_l = 0$ 时，处于不灵敏动作状态。但即使是不灵敏状态，在K值相同时，也比传统判据动作灵敏度高。图5是一三端系统内部接地短路数字仿真实例。东芝及GEC的判据均不能动作。本文的高灵敏判据仍能可靠动作。



(a) 高阻接地示意图

(b) 三侧电流向量图

图5 三端系统单相接地短路

如下形式。

$$I_m + I_n - I_t > K(I_m - I_n + I_t) \quad (19)$$

或者：

$$(1 - K)I_m / (1 + K) + I_n > I_t \quad (20)$$

从上式看出，无论  $K = 1$  还是  $0.6$ ，该式永远成立。保护动作与流出电流的大小无关。

负荷状态下发生有电流流出的内部故障时，可将全电流  $\dot{I}$  看作负荷分量  $\dot{I}'$  和故障分量  $\dot{I}''$  的叠加。(8)式可写成如下形式。

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n + \dot{I}_t| > K |\dot{I}_m - (\dot{I}_n' + \dot{I}_t') + \dot{I}_n'' - (\dot{I}_n' + \dot{I}_t')| \quad (21)$$

令  $\dot{I}_n' + \dot{I}_t' = K_1 \dot{I}_n''$ ， $\dot{I}_n + \dot{I}_t = -\dot{I}_n''$ ，则上式改写为：

$$|\dot{I}_m(1 + K_1)| > K |\dot{I}_m(1 - K_1) + 2\dot{I}_n''| \quad (22)$$

将(22)式两端按余弦定理展开整理如下：

$$aQ^2 + aQ + c > 0 \quad (23)$$

其中  $Q = I_n'' / I_m'$ ，

$$a = (1 + K_1 - K^2 + K^2 K_1)(1 + K_1 + K^2 - K^2 K_1)$$

$$b = -4K^2(1 - K_1)\cos\varphi$$

$$c = -4K^2$$

$\varphi$ ： $\dot{I}_n''$  与  $\dot{I}_m'$  间相角。

取几种最不利的情况分析新判据的动作行为。第一，令  $\varphi = 0^\circ$ ，这只是一种理论上极端状态，实际上大部分区内故障  $\varphi$  角都分布在  $90^\circ$  左右的一段范围内。第二， $K_1 = 0$  或  $I_n'' = I_t'$ 。这相当于 n 侧与 t 侧无电源，t 端流出的电流又从 n 端流回。

$\varphi = 0^\circ$  时用(23)式分析低灵敏判据的动作行为。求得：

$$Q > 1/K_1 \quad (24)$$

根据上述的代换关系，又可改写为：

$$I_m - I_t' > I_m' \quad (25)$$

上式说明，只要 n 与 t 侧故障分量的差值大于 m 侧的负荷分量，保护就能可靠动作。一般

情况下, 这个条件是能够满足的。当  $I'_m = I'_n$  时, 低灵敏判据不反应有电流流出的内部故障。

高灵敏判据在  $\varphi = 0^\circ$ ,  $I_m = I'_m$  时, 动作条件为:

$$I_m > 2.2 I'_m \quad (26)$$

实际上很少发生  $I'_m = I'_n$  的现象。如  $K_1 = 0.2$  时, 高灵敏动作条件为:

$$I_m > 1.5 I'_m \quad (27)$$

若考虑  $\varphi = 90^\circ$ ,  $K_1 = 0$  时

$$I'_m > 1.3 I'_n \quad (28)$$

$K_1 = 0.2$  时,

$$I'_m > 1.04 I'_n \quad (29)$$

除极个别重负荷下高电阻故障外, 上述动作条件一般是能够满足的。值得注意的是, 新判据反应有电流流出的内部故障, 不是像传统判据那样, 以降低外部短路时的防卫能力为代价, 而是利用了计算机可以实时计算的特点, 找出  $I_{max}$ , 从而将区外故障与有电流流出的区内故障当做两个不同的问题来处理, 既保持了区外短路时高度的安全性, 又可以灵敏反应有电流流出的内部故障。

#### 4 故障处理过程

图 6 示出故障处理过程中三种判据之间的工作配合关系。

从故障起到富氏窗完成前这段时间称为保护算法的动态过程。在这段时间内投入跳闸判据可加速区内故障的处理速度。文献<sup>(4)</sup>对这种动态跳闸方式作了详细论述。动态过程中投入保守判据, 可以使大部分区内短路得到快速处理, 同时又保持了对外部故障的很高的防卫能力。

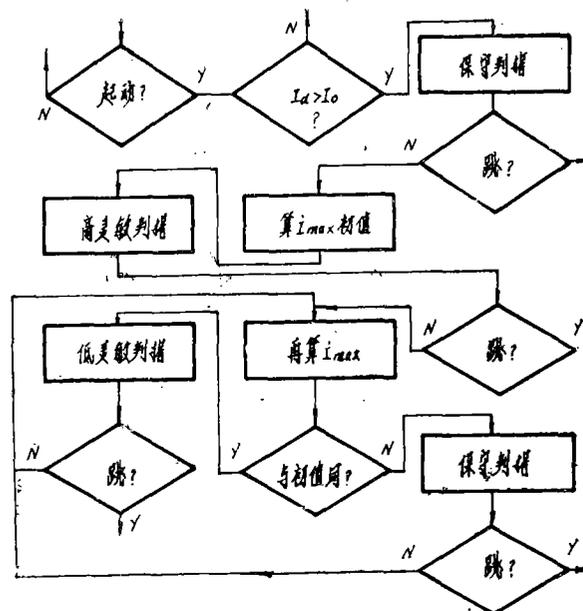


图 6 故障处理工作配合示意图

富氏窗完成以后, 计算 $I_{m..}$ , 然后投入高灵敏判据, 用以处理可能发生的重负荷, 高电阻内部故障和有电流流出的内部短路。若确实发生区内故障, 到这个阶段将完成跳闸处理。

高灵敏判据测定为区外故障后, 再算 $\dot{I}_{m..}$ 并与第一次计算值比较, 两者相同, 认为 CT 没有明显饱和。但这时投入低灵敏判据, 以求 CT 某种程度饱和时, 增加区外故障时保护的防卫能力。若两次 $\dot{I}_{m..}$ 选择结果不同, 认为 CT 出现较重饱和, 投入保守判据, 防止错误动作。

高灵敏判据只在故障起动后短时投入。尔后将通过计算 $\dot{I}_{m..}$ 来选择投入保守或低灵敏判据, 直至整组复归。

需说明, 图 6 只用以介绍三种判据间的工作配合关系, 并不是故障处理程序的实际框图

## 5 结束语

本文提出保守、高、低灵敏三种电流差动保护跳闸判据。这组判据在故障后依不同情况。分时切换投入, 既保证了区外短路保护具有足够的防卫能力, 又提高了内部故障时的动作灵敏性。尤其是发生有电流流出的内部故障时, 保护有较高的灵敏度做出跳闸判断。

各种判据经过大量数字仿真试验, 判断准确无误。目前, 用于三端系统的样机正处调试阶段, 并进行试运行前的准备工作。

### 参考文献

- [1] 贺家李、葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护. 科学出版社
- [2] Instruction Manual Digital Current Differential Relay. Toshiba Corporation.
- [3] A Microprocessor—Based Current Differential Relay for Use with Digital Communication systems. W.S.K wong, H.J. Clayton, A. Newbold(Third International Conference on Development in Power System Protection)
- [4] 王绪昭、伍叶凯、杨奇逊. 一种适用于双端系统微机微波电流差动保护的跳闸判据. 继电器. 1991.4.