

# 电流采样值差动保护若干问题的探讨

林湘宁<sup>1,2</sup>, 何战虎<sup>2</sup>, 刘世明<sup>1,2</sup>, 杨春明<sup>2</sup>, 刘 沛<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电力系, 武汉 430074; 2. 东方电子信息产业股份有限公司综合所, 山东烟台 264001)

**摘要:** 电流采样值差动保护在各种差动保护中逐渐体现了其独具的优越性。为更好地应用该保护判据, 文中详细分析了采样初相角、判据的数据窗长度  $R$  的选取、整定门槛  $I_{\text{set}}$  与重复判断次数  $S$  的相互关系及对采样值差动保护的影响等, 严格论证了现有的一些推论, 并提出了进一步优化采样值差动判据的设想。最后对各种设想均进行理论分析, 证明了其可行性。

**关键词:** 采样值差动保护; 采样初相角; 脉冲干扰

**中图分类号:** TM 773

## 0 引言

电流差动保护原理于 1904 年由 C. H. Merz 和 B. Price 在英国提出, 尽管其实现方式存在一些差别, 但基本原理沿用至今, 它是各种电气设备使用最广泛的一种保护方式。常规的电流差动继电器反映的差电流是流入被保护设备的各支路电流之和, 继电器的工作原理可以反映和电流的有效值或平均值等。目前, 大部分微机差动保护的原理与常规差动保护相同, 即计算出差动电流和(或)制动电流的幅值、相位后用相量比较的方式构成判据。

近年来, 一种直接利用采样值实现的差动保护原理逐渐在工程中得到实际应用<sup>[1]</sup>。根据基尔霍夫定律, 流入一个节点的各支路电流之和为 0, 无论对于瞬时值和还是相量和, 该定律均成立。对微机保护而言, 只要所采得的是各支路电流在同一时刻的瞬时值, 在被保护设备没有横向短路故障时, 各采样值之和为 0。发生横向短路故障后, 亦即被保护设备额外增加一个支路时, 原来各支路电流的瞬时值之和便等于新增故障支路的电流的瞬时值。利用此采样值电流之和(称做采样值差动电流)即可构成采样值差动保护判据。与相量差动保护相比, 采样值差动具有一些独特的特点。在与采样初始时刻相关的各种算法中, 采样值电流差动算法受到的影响最大, 其结果是带来了一定的动作边界变化区, 该边界变化区的上下界与采样率有关。文献[1]根据几个特例给出了采样值差动判据的动作变化区上下界, 但未来得及做严格论证, 本文对该问题进行补充论证, 给出了初始采样为任意时刻时所需动作量的一般表达式; 另一方面, 根据本文的研究, 采样值差动门槛的确定

对模糊动作区域的大小有直接影响, 在保证判别效果一致的情况下, 可以考虑改进现有的固定门槛取值方法, 缩小判据的模糊区。实际上, 由于采样值差动原理中还有不少比较复杂的课题值得深入研究, 限于篇幅, 本文拟就最基本的采样值差动保护原理  $i_d \geq i_{d0}$  做一些探讨, 希望能够得到一些有益的结论。

## 1 采样初相角对采样值差动保护的影响

如无特殊说明, 下面讨论的均为最基本的差动保护原理<sup>[2]</sup>:

$$i_d \geq i_{d0} \quad (1)$$

其中  $i_d$  为差电流采样值;  $i_{d0}$  为动作门槛, 为正常数。

采样值差动判据的一般性原则是: 在一定的采样率(每周期  $N$  点)下, 连续采样  $R$  点, 其中如果有  $S$  点满足动作条件, 保护动作。即所谓的“ $R$  取  $S$ ”原则。令差电流  $i_d$  为:

$$i_d = I_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

对动作判据  $|I_d| \geq I_{\text{set}}$  而言,  $|I_d|$  的变化周期为工频周期的  $1/2$ , 因此  $R = N/2$  是比较容易展开讨论的取值, 当  $R \neq N/2$  时, 根据本文的讨论, 可以用分数  $S/R$  与  $R = N/2$  条件下的情况进行对比后评估该取值的判别效果。

令采样初相角为  $\beta$ , 等效采样间隔角为  $\Delta\alpha$ , 容易推论, 当  $\beta$  为  $\Delta\alpha$  的整数倍 ( $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha) = 0$ ) 时, 在  $|I_d|$  的一个周期(即  $1/2$  工频周期)内, 通过平移和对称翻转, 总能得到相同的波形, 图 1 给出了几个例子, 此时  $N = 16, R = 8$ 。

由图 1 可见, 从  $t = 0$  起, 采集 8 个点作为一个集合, 对应图 1 有 4 个集合, 每个集合有 8 个元素。容易知道, 4 个集合中的 8 个元素是完全相同的。换句话说, 以这 8 个点( $R$ )为基准, 评估“ $R$  取  $S$ ”的采

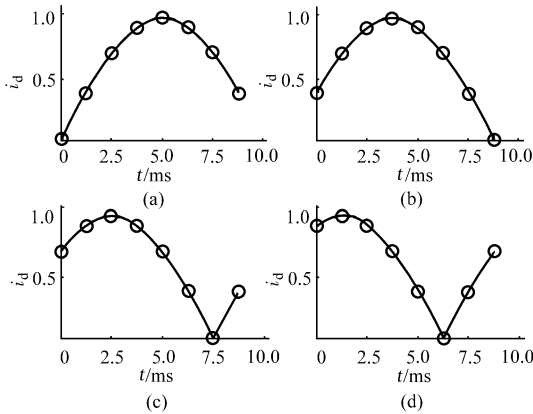


图1 采样初始角为采样间隔角整数倍时的采样集合  
Fig. 1 Some sampling sets as the initial sampling angle equals to the integral times of sampling interval angle

样值差动判据,无论  $S$  为何值,结果均是相同的。可见,当  $\beta$  为  $\Delta\alpha$  的整数倍时,对采样值差动判据而言,可视同一种情况进行考虑。因此,在讨论采样初相角  $\beta$  对判据的影响时,可首先将其对  $\Delta\alpha$  取模:

$$\gamma = \text{mod}(\beta, \Delta\alpha) = k\Delta\alpha \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (3)$$

式中  $k$  为初相角系数。

$k$  取 0 或 1 时判据效果相同。下面讨论当  $k$  从 0 变化到 1 时,  $k$  与动作倍数  $I_d/I_{\text{set}}$  的关系。

$S$  的取值(奇数和偶数)不同时,对“ $R$  取  $S$ ”判据而言,最有利与最不利的动作条件是相反的,因此需要分 2 种情况讨论。

### 1.1 $S$ 为奇数的情况

#### 1.1.1 $k=0$

对该问题的讨论可用图 2 进行分析。在本文图 2~图 9 中,均固定采样电流的幅值为 1,讨论采样起始角变化时,满足“ $R$  取  $S$ ”条件的采样电流有效值与门槛值之比应达到的数值。当  $I_d$  固定时,  $I_d/I_{\text{set}}$  越大,表明需要将动作门槛降得越低,换句话说,当门槛值固定时,需要达到的动作电流越高,即动作越不灵敏。因此,可以用  $I_d/I_{\text{set}}$  来评估判据的动作灵敏性。

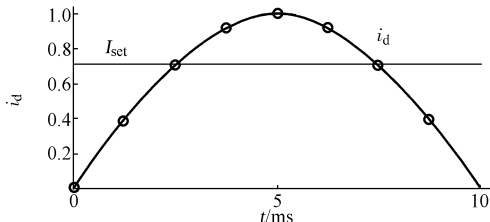


图2  $S$  为奇数时最有利的动作条件  
Fig. 2 The most sensitive tripping condition as  $S$  equals to odd number

图 2 为差电流  $i_d$  的波形。假设该差电流满足临

界动作条件,则在应用“ $R$  取  $S$ ”(图中  $S=5$ ,  $S$  取其他奇数的情况可依此类推)的采样值差动判据时,动作门槛  $I_{\text{set}}$  的设定应使得高于或等于该门槛的波形正好包括了  $S$  个采样点,如图所示。容易知道,当  $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha)=0$  时,8 个采样点中一定有 1 个采样点过峰值,对  $S$  为奇数的判据而言,这是一种最有利的情况,只需从峰值点对称地向下回溯包含  $(S-1)/2$  个点,即可在半个工频周期内包含  $S$  个点。此时,与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d \left( \frac{N}{4} - \frac{S-1}{2} \right) = I_{\text{dm}} \sin \left( 90^\circ - \frac{1}{2} (S-1) \Delta\alpha \right) \quad (4)$$

式中  $I_d$  为临界动作电流的有效值。

将此采样值作为门槛  $I_{\text{set}}$ ,可以保证在  $R$  点中有  $S$  点满足动作条件,即:

$$I_{\text{set}} = I_{\text{dm}} \sin \left( 90^\circ - \frac{1}{2} (S-1) \Delta\alpha \right) \quad (5)$$

此时,有:

$$\frac{I_{\text{dm}}}{I_{\text{set}}} = \frac{1}{\cos \left( \frac{1}{2} (S-1) \Delta\alpha \right)} \quad (6)$$

用有效值表示,有:

$$\frac{I_d}{I_{\text{set}}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \frac{1}{2} (S-1) \Delta\alpha \right)} \quad (7)$$

#### 1.1.2 $k=0.5$

如图 3 所示,此时 8 个采样点对称地分布在正弦峰值的两侧,且无一点过峰值。

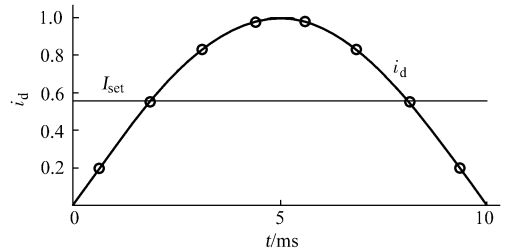


图3  $S$  为奇数时最不利的动作条件  
Fig. 3 The most insensitive tripping condition as  $S$  equals to odd number

这种情况对动作最不利,需从峰值最邻近的点  $(90^\circ - \Delta\alpha/2)$  对称地向下回溯包含  $(S-1)/2$  个点,即在半个工频周期内包含  $S+1$  个点,  $R$  点中有  $S$  点可以动作的条件方成立。

此时,与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d \left( \frac{N}{4} - \frac{1}{2} - \frac{S-1}{2} \right) = I_{\text{dm}} \sin \left( 90^\circ - \frac{1}{2} \Delta\alpha - \frac{1}{2} (S-1) \Delta\alpha \right) \quad (8)$$

将此采样值作为门槛  $I_{\text{set}}$ ,可以保证在  $R$  点中有  $S$  点满足动作条件。

同理,有

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos\left(\frac{1}{2}S\Delta\alpha\right)} \quad (9)$$

### 1.1.3 $0 < k < 0.5$

如图4所示,此时8个采样点不对称地分布在正弦峰值的两侧。以峰值为对称轴,左侧的最临近采样值要小于右侧的最临近采样值。所以,从右侧峰值附近的点( $90^\circ + k\Delta\alpha$ )向下回溯包含 $(S-1)/2$ 个点,以最后点的采样值为门槛,即可保证在 $R$ 点中有 $S$ 点满足动作条件。

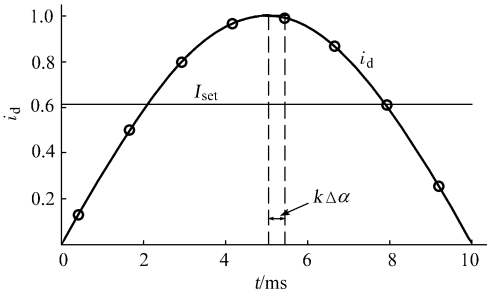


图4  $S$  为奇数且  $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha) < \Delta\alpha/2$  时动作门槛的确定

Fig. 4 The determination of threshold as  $S$  equals to odd number and  $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha)$  is less than  $\Delta\alpha/2$

此时,与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d\left(\frac{N}{4} + k + \frac{S-1}{2}\right) = I_{dm} \sin\left(90^\circ + k\Delta\alpha + \frac{1}{2}(S-1)\Delta\alpha\right) \quad (10)$$

将此采样值作为门槛  $I_{set}$ ,可以保证在 $R$ 点中有 $S$ 点满足动作条件。

同理,有

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos\left(\left(\frac{1}{2}(S-1) + k\right)\Delta\alpha\right)} \quad (11)$$

当  $k=0$  时,则为式(7),当  $k=0.5$  时,则为式(9)。根据式(11)可知, $k$  在 $(0, 0.5)$ 区间内, $I_d/I_{set}$  单调增加,即保护动作趋向最不灵敏。

### 1.1.4 $0.5 < k \leq 1$

如图5所示,此时,8个采样点不对称地分布在正弦峰值的两侧。以峰值为对称轴,左侧的最邻近采样值要大于右侧的最临近采样值。所以,从左侧峰值附近的点( $90^\circ - (1-k)\Delta\alpha$ )向下回溯包含 $(S-1)/2$ 个点,以最后点的采样值为门槛,即可保证在 $R$ 点中有 $S$ 点满足动作条件。此时,与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d\left(\frac{N}{4} - (1-k) - \frac{S-1}{2}\right) = I_{dm} \sin\left(90^\circ - (1-k)\Delta\alpha - \frac{1}{2}(S-1)\Delta\alpha\right) \quad (12)$$

将此采样值作为门槛  $I_{set}$ ,可以保证在 $R$ 点中有 $S$ 点满足动作条件。

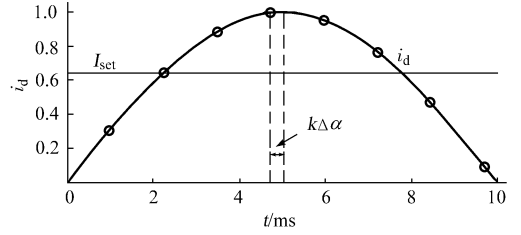


图5  $S$  为奇数且  $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha) > \Delta\alpha/2$  时动作门槛的确定

Fig. 5 The determination of threshold as  $S$  equals to odd number and  $\text{mod}(\beta, \Delta\alpha)$  is greater than  $\Delta\alpha/2$

同理,有

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos\left(\left(\frac{1}{2}(S+1) - k\right)\Delta\alpha\right)} \quad (13)$$

当  $k=0.5$  时,则为式(9),当  $k=1$  时,则为式(7)。 $k$  在 $(0.5, 1)$ 区间内, $I_d/I_{set}$  单调递减,保护动作趋向最灵敏。

综上所述,当  $k=0$  或  $1$  时, $I_d/I_{set}$  取得最小值,动作最灵敏;当  $k=0.5$  时, $I_d/I_{set}$  取得最大值,最不易动作。当  $k$  在 $(0, 0.5)$ 或 $(0.5, 1)$ 之间变化时, $I_d/I_{set}$  位于最大值和最小值之间,变化规律如式(11)或式(13)所示。

## 1.2 $S$ 为偶数的情况

### 1.2.1 $k=0$

图6中, $S=6$ ( $S$  为其他偶数的情况可依此类推)。此时,在8个采样点中,一定有1个采样点过峰值。对动作而言这是一种最不利的情况,因为峰值点对动作判据无法起到应有的作用。由于该点的加入,使得以峰值为对称轴所包含的动作点数为奇数,为保证 $S$  点为偶数时动作,必须要从峰值点对称地向下回溯包含 $S/2$  个点,即总共要要在半个工频周期内包含 $S+1$  个点,才能满足 $R$  点中有 $S$  点进入动作区的条件。

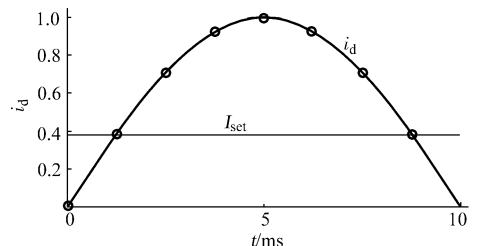


图6  $S$  为偶数时最不利的动作条件

Fig. 6 The most insensitive tripping condition as  $S$  equals to even number

此时,与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d \left( \frac{N}{4} - \frac{S}{2} \right) = I_{dm} \sin \left( 90^\circ - \frac{1}{2} S \Delta \alpha \right) \quad (14)$$

上述采样值即可作为门槛  $I_{set}$ 。将相应的峰值用有效值表示,有

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \frac{1}{2} S \Delta \alpha \right)} \quad (15)$$

### 1.2.2 $k=0.5$

参照第 1.1.2 节与 1.2.1 节,可以方便地确定此时保护的動作门槛,限于篇幅,不再做详细推导,示意图见图 7。

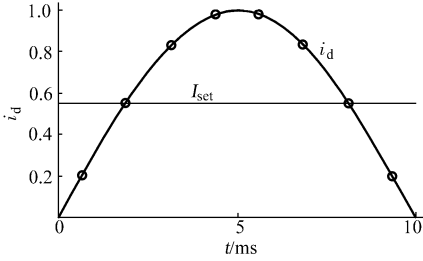


图 7  $S$  为偶数时最有利的動作条件  
Fig. 7 The most sensitive tripping condition as  $S$  equals to even number

与门槛对应的采样瞬时值为:

$$I_d \left( \frac{N}{4} - \frac{1}{2} - \frac{S-2}{2} \right) = I_{dm} \sin \left( 90^\circ - \frac{1}{2} \Delta \alpha - \frac{1}{2} (S-2) \Delta \alpha \right) \quad (16)$$

相应地有:

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \frac{1}{2} (S-1) \Delta \alpha \right)} \quad (17)$$

### 1.2.3 $0 < k < 0.5$

如图 8 所示,参照第 1.1.3 节与第 1.2.1 节确定此时保护的動作门槛,有:

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \left( \frac{1}{2} S - k \right) \Delta \alpha \right)} \quad (18)$$

当  $k=0$  时,则为式(15),当  $k=0.5$  时,则为式(17)。 $k$  在  $(0.5, 1)$  区间内,  $I_d/I_{set}$  单调递减,保护趋向最灵敏。

### 1.2.4 $0.5 < k \leq 1$

如图 9 所示,参照第 1.1.4 节与第 1.2.1 节确定此时保护的動作门槛,有

$$\frac{I_d}{I_{set}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \left( \frac{1}{2} S + k - 1 \right) \Delta \alpha \right)} \quad (19)$$

当  $k=0.5$  时,则为式(17),当  $k=1$  时,则为式(15)。 $k$  在  $(0.5, 1)$  区间内,  $I_d/I_{set}$  单调递增,保护趋向最不灵敏。

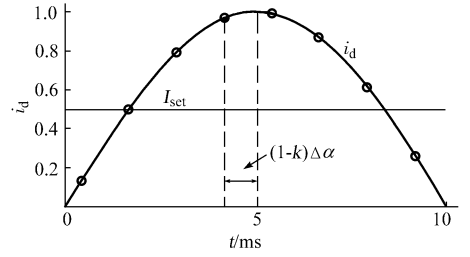


图 8  $S$  为偶数且  $\text{mod}(\beta, \Delta \alpha) < \Delta \alpha / 2$  时  
動作门槛的确定

Fig. 8 The determination of threshold as  $S$  equals to even number and  $\text{mod}(\beta, \Delta \alpha)$  is less than  $\Delta \alpha / 2$

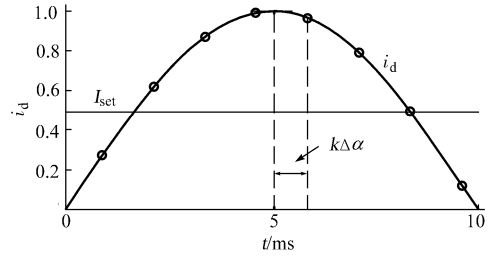


图 9  $S$  为偶数且  $\text{mod}(\beta, \Delta \alpha) > \Delta \alpha / 2$  时  
動作门槛的确定

Fig. 9 The determination of threshold as  $S$  equals to even number and  $\text{mod}(\beta, \Delta \alpha)$  is greater than  $\Delta \alpha / 2$

综上所述,当  $k=0$  或  $1$  时,  $I_d/I_{set}$  取得最大值,最不易动作;当  $k=0.5$  时,  $I_d/I_{set}$  取得最小值,动作最灵敏。当  $k$  在  $(0, 0.5)$  或  $(0.5, 1)$  之间变化时,  $I_d/I_{set}$  位于最大值和最小值之间,变化规律如式(18)或式(19)所示。

根据式(7)、式(9)、式(15)、式(17)可知,无论  $S$  为奇数或偶数,判据模糊区的上下界表达式是一致的,且与文献[1]中的推论相同。利用上述各式还可评估当  $R=N/2$ ,  $S$  取不同值时,模糊动作区的范围,见表 1。此时  $N=16, R=8$ 。

表 1  $S$  变化时判据模糊动作区上下界与模糊域大小  
Table 1 The superior and inferior limits and the size of the fuzzy tripping area of the current sampling differential criterion as  $S$  is changed

| $S$ | $A_{\min}$ | $A_{\max}$ | $K_{\text{fuzzy}} / (\%)$ |
|-----|------------|------------|---------------------------|
| 4   | 0.85       | 1.00       | 18                        |
| 5   | 1.00       | 1.27       | 27                        |
| 6   | 1.27       | 1.85       | 50                        |
| 7   | 1.85       | 3.62       | 99                        |
| 8   | 3.62       | $\infty$   | $\infty$                  |

注:  $A = I_d/I_{set}$ 。

根据表 1,对“ $R(R=N/2)$ 取  $S$ ”的采样值差动判据,可以得出以下几点结论:

a. 当  $R$  固定时,对于每个  $S$ ,均存在一个動作上限  $(I_d/I_{set})_{\max}$  (记为  $A_{\max}$ ) 和動作下限  $(I_d/I_{set})_{\min}$

(记为  $A_{\min}$ ), 当动作电流倍数  $I_d/I_{\text{set}}$  大于动作上限时, 保护可靠动作, 小于动作下限时, 可靠不动作; 中间为模糊动作区, 当采样初相角满足一定条件时动作。

b. 当  $R$  一定时,  $S$  取值越大, 对应模糊动作区的范围越大。如果以  $K_{\text{fuzzy}} = (A_{\max} - A_{\min}) / A_{\min}$  考察模糊动作区, 从表 1 可以看出, 该模糊动作区随  $S$  的增加而单调递增。

c.  $S$  对应的动作上限为  $S+1$  的动作下限。

d. 当  $S=N/4$  时, 保护的模糊动作区已落在误动范围内。

由表 1,  $S=4$  的模糊动作区为  $[0.85, 1]$ , 当  $I_d/I_{\text{set}}$  落在该范围内 (差电流的有效值小于动作门槛) 时, 如果采样初相角满足一定条件, “8 取 4” 的条件可以达到, 保护将动作。由于保护正确动作时要求满足  $I_d > I_{\text{set}}$ , 显然, 这种动作情况为误动作。

## 2 $R < N/2$ 时“ $R$ 取 $S$ ”判据的性能评估

由以上分析可知, 当以门槛电流的有效值确定门槛且  $R=N/2$  时, 只要  $S > N/4$ , 如果不考虑各种干扰, 保护的安全性是可以保证的。下面通过改变  $S/R$  评估判据的可靠性和安全性。为叙述方便, 这里将  $S/R$  称为安全动作系数。

以 16 点采样为例, 设  $C=(R, S)$ , 对 3 组判据  $C=(8, 5), (7, 5), (8, 6)$  进行对比分析。

对  $S=5$  而言, 如图 10 所示。当  $\beta$  为  $\Delta\alpha$  的整数倍且  $I_d/I_{\text{set}}=1$  时, 无论  $\beta$  为何值 (但必须保证为  $\Delta\alpha$  的整数倍), “8 取 5” 的判据均令保护动作。对 “7 取 5” 而言, 从第 1, 2, 3 点为起点采用 7 点数据窗向后覆盖, 可以包含 5 个动作点, 此时保护可以动作; 从第 4 点~第 8 点为起点采用 7 点数据窗向后覆盖, 最多只能包含 4 个动作点, 保护不动作。可见, “7 取 5” 的动作可靠性要低于 “8 取 5”, 然而其安全性相对较高。

对 “8 取 6” 判据而言, 令  $\beta$  为  $\Delta\alpha/2$  的奇数倍, 如图 11 所示。此时  $I_d/I_{\text{set}}$  取得最小值,  $I_d/I_{\text{set}}=1.27$ , 此时保护动作已为最灵敏, 亦即当  $I_d/I_{\text{set}} < 1.27$  时, “8 取 6” 的保护判据将始终不能动作。然而, 从上面的例子可知, 即使  $I_d/I_{\text{set}}=1$ , “7 取 5” 仍可能动作, 即 “7 取 5” 的可靠性要高于 “8 取 6”。

由此可见, 在 3 组判据中,  $(8, 5)$  可靠性最高,  $(8, 6)$  安全性最高,  $(7, 5)$  的可靠性和安全性位于两者之间。限于篇幅, 这里仅初步评估了  $R < N/2$  时的判据效果, 有兴趣的读者可类似地评估  $R > N/2$  时的判据性能, 最终的结论应该是一致的, 即判据的

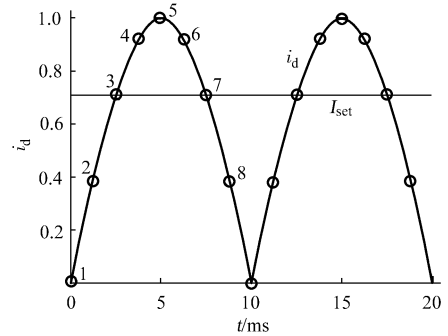


图 10 判据“8 取 5”与“7 取 5”的对比分析  
Fig. 10 The comparison between the criterion with  $R$  being 8 and  $S$  being 5 and the one with  $R$  being 7 and  $S$  being 5

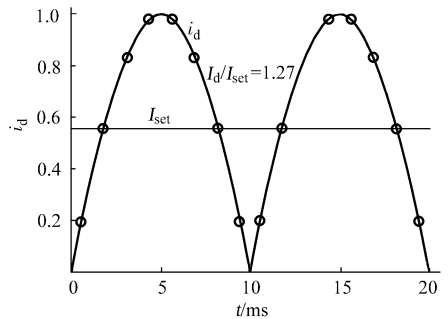


图 11 判据“8 取 6”与“7 取 5”的对比分析  
Fig. 11 The comparison between the criterion with  $R$  being 8 and  $S$  being 6 and the one with  $R$  being 7 and  $S$  being 5

可靠性和安全性可用指标  $S/R$  进行评估, 通过与整周期  $R(N/2$  或  $N)$  取值的判据进行比较, 即可得到明确的结论。根据上面的分析可知,  $S/R$  的值越大, 保护安全性越高, 但动作可靠性相对较差; 反之,  $S/R$  较小时, 保护动作可靠性较高, 而安全性较低。

## 3 整定值 $I_{\text{set}}$ 与“ $R$ 取 $S$ ”判据的相互关系

以上分析均以最大不平衡电流的有效值  $I_{\text{set}}$  为门槛, 然后与差电流的采样值进行比较, 从中进行 “ $R$  取  $S$ ” 判决。文献 [2] 认为, 在这种情况下,  $R-S=2, S > N/4$  是一种比较合适的取法。然而, 根据以上的分析,  $S/R$  和  $S$  越大, 则判据的模糊动作区越大, 对于一向习惯于精确整定各种定值的继电保护运行部门来说, 采样值差动特性门槛或斜率随采样初相角变化的现象会给他们带来迷惑, 进而可能影响采用该原理保护的推广; 另一方面, 如果固定以最大不平衡电流有效值  $I_{\text{set}}$  为门槛, 则对于确定的 “ $R$  取  $S$ ” 判据, 其可靠动作系数 (模糊动作区上限) 也是固定的, 然而, 这会带来精确调整可靠系数的困难。如表 1 所示, “8 取 5” 判据的可靠系数应

为 1.27, “8 取 6”判据为 1.85, 即可靠系数随  $S$  的增加而阶跃式递增, 如果固定  $I_{\text{set}}$ , 则无法获得 1.27~1.85 间的任意可靠系数。因此, 在可能的情况下, 应尽量减小模糊判据区的范围, 并在由用户整定最大不平衡电流  $I_{\text{set}}$  和可靠系数的条件下, 在程序内部, 根据采用的“ $R$  取  $S$ ”判据, 自适应地调整  $I_{\text{set}}$ , 使总体判据满足任意可靠系数的要求。

容易知道, 对同一个差动电流而言, 门槛越高, 则判据的安全性越高。而在“ $R$  取  $S$ ”的判据中, 当  $R$  一定时,  $S$  越小, 判据的可靠性(灵敏性)越高。因此, 无论是抬高定值门槛  $I_{\text{set}}$  还是升高  $S$  都可以起到加强判据安全性的作用。亦即, 如果一方面抬高门槛  $I_{\text{set}}$ , 另一方面降低  $S$ , 在取值适当的情况下, 可以取得与原判据相同的可靠动作性能或可靠制动性能。此时, 对判据安全性的考验主要来自脉冲干扰。对于可能出现的脉冲干扰, 即使  $S < N/4$ , 只要采样率较高, 使得  $S$  的实际值较大时, 在提高后的门槛把关下, 判据的安全性不会有明显降低。而这种判据的好处在于, 当  $S$  降低时, “ $R$  取  $S$ ”的模糊动作范围将缩小, 这对提高判据的稳定性是有帮助的。显然, 当新的门槛大于原来的  $I_{\text{set}}$  时,  $S$  的取值可不必拘泥于大于  $N/4$ ,  $R-S$  也不必一定取为 2, 仍可保证判据的安全性。下面是几种具体取值的例子, 从中可以看出, 采用本节中的方法实现采样值差动, 既可保证保护具有同样安全性, 又缩小了模糊动作区。

a. 利用原  $I_{\text{set}}$  的峰值  $I_m$  作为新的整定门槛, 理论上, 无论采样初相角如何变化, 峰值小于  $I_m$  的所有  $I_d$  将始终不会有一个点越过  $I_m$ , 因此, 在不考虑干扰的前提下, 无论“ $R$  取  $S$ ”中的  $S$  如何取值, 判据总是安全的。此时, 如果采用“8 取 4”原则, 模糊动作区( $I_d/I_m$ )范围是  $[0.85, 1]$ , 将  $I_m$  换算成有效值, 有  $I_d/I_{\text{set}}$  在  $[1.20, 1.41]$ , 即当  $I_d > 1.41I_{\text{set}}$  时, 保护可靠动作。此时, 当  $I_{\text{set}}$  直接按照最大不平衡电流整定时, 对该采样值差动判据而言, 已相应具备了一个可靠系数 1.41, 该判据可靠不动作的临界值位于表 1 中“8 取 5”的模糊动作区、可靠动作的临界值位于“8 取 6”判据的模糊动作区, 此时判据的模糊动作区为 18%, 小于上述 2 种判据。对于该判据, 只要在每次判断的 8 个连续采样点中不出现 4 次及以上的助增脉冲干扰(导致采样值从不满足动作条件到满足), 判据即是安全的。

b. 进一步地, 以  $I_{\text{mm}} = 1.5I_{\text{set}}$  为门槛, 仍采用“8 取 4”原则, 模糊动作区( $I_d/I_{\text{mm}}$ )范围为  $[0.85, 1]$ , 将

$I_{\text{mm}}$  换算成  $I_{\text{set}}$ , 有  $I_d/I_{\text{set}}$  在  $[1.28, 1.5]$ , 即当  $I_d > 1.5I_{\text{set}}$  时, 保护可靠动作。当  $I_d < 1.28I_{\text{set}}$  时, 保护始终不动作, 模糊区仍为 18%, 如果  $I_{\text{set}}$  仍按最大不平衡电流整定, 此时的可靠系数将相应地调整为 1.5。而对根据原来方法进行整定的“8 取 6”( $R-S=2$ )判据而言, 即采用  $I_{\text{mm}} = I_{\text{set}}$ , 根据表 1, 则判据相当于乘以一个 1.85 的可靠系数, 且该系数不可调。相应地, 该判据的灵敏度要低于此处提出的判据, 并且其模糊动作区将达到 50%。

c. 进一步以  $I_{\text{mm}} = 1.765I_{\text{set}}$  为门槛, 同样, 任何小于  $I_{\text{set}}$  的差电流不会有一个点满足动作条件。如果采用“8 取 3”原则, 则模糊动作范围为  $[0.765, 0.85]$ , 将  $I_{\text{mm}}$  换算成  $I_{\text{set}}$ , 有  $I_d/I_{\text{set}}$  在  $[1.35, 1.5]$ , 即当  $I_d > 1.5I_{\text{set}}$  时, 保护可靠动作。当  $I_d < 1.35I_{\text{set}}$  时, 保护始终不动作。此时可靠系数仍为 1.5, 而模糊区进一步缩小为 11%。只要每次判断时不出现 3 次以上的助增脉冲干扰, 判据总能正确判断。

因此, 通过调高实际动作门槛  $I_{\text{mm}}$ , 当采样率较高时, 只要  $S$  的取值可避开可能出现的连续脉冲干扰, 则不必拘泥于  $S > N/4$  和  $R-S=2$ 。此时, 只要选择适当的  $I_{\text{mm}}$ , 可以在保证判据本身可靠性不变的同时, 减少采样值差动判据的模糊判断区。容易看出, 采用这里提出的变门槛采样值差动判据, 可以明显体现出采样率提高可进一步提高保护的速动性。

## 4 结论

由于采样值差动判据涉及到的实际问题较多, 本文仅就最简单的  $i_d \geq i_{d0}$  判据进行了一些分析, 可得到以下一些结论:

a. 对采样值差动判据“ $R$  取  $S$ ”而言, 对于固定的采样率  $N$ , 动作电流倍数与采样初相角存在一个确定的函数关系, 并且与  $S$  的奇偶性有关, 本文给出了该对应关系, 并由此论证了文献[1]中关于模糊动作区上下界的结论。

b. 当以整定电流的有效值确定门槛时, 要确保保护不误动, 应有  $S > N/4$ 。此时, 可以用  $S/R$  评估判据的效果。 $S/R$  的值越大, 判据的安全性越高, 而动作可靠性相对较差; 反之,  $S/R$  越小, 保护动作可靠性较高, 而安全性较低。

c. 对采样值差动判据而言, 判据的性能由动作门槛  $I_{\text{set}}$  和安全动作系数  $S/R$  共同决定。如果一方面抬高门槛  $I_{\text{set}}$ , 另一方面降低  $S$ , 在取值适当的情况下, 可以取得与原判据相同的可靠动作或制动性

能,同时缩小了原判据的模糊动作区,并有可能进一步提高保护的動作速度。然而,判据抗脉冲干扰能力有所下降,运行部门可根据实际系统运行的情况和要求向厂家提出相应的供货要求。

对于其他的电流差动判据形式(尤其是比例制判据),分析起来将更为复杂,作者将在后续论文中展开对其他判据的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 陈德树,马天浩,刘 沛(Chen Deshu, Ma Tianhao, Liu Pei). 采样值电流差动微机保护的一些问题(Problems in Realization of Microcomputer Based Differential Current Protection by Sampled Values). 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1996,

16(4):3~8

- 2 陈德树,尹项根,张 哲(Chen Deshu, Yin Xianggen, Zhang Zhe). 再谈采样值保护的一些问题(On Problems About Sampled Value Differential Protection). 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2000, 20(4):1~3

---

林湘宁,男,博士,研究方向为现代信号处理技术在继电保护中的应用及新型微机保护与监控产品的研发。

何战虎,男,教授级高级工程师,总工程师,从事继电保护及变电站综合自动化产品的设计、研究与开发工作。

刘世明,男,博士,研究课题为高性能微机保护原理的研究及装置的开发。

## DISCUSSIONS ON SOME ASPECTS OF SAMPLING VALUE DIFFERENTIAL CURRENT PROTECTION

*Lin Xiangning<sup>1,2</sup>, He Zhanhu<sup>2</sup>, Liu Shiming<sup>1,2</sup>, Yang Chunming<sup>2</sup>, Liu Pei<sup>1</sup>*

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2. Dongfang Electronic Inc, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Sampling value based differential current protection possesses the unique advantages in comparison with other types of differential protections. However, the existing studies on the criterion are somewhat absent. In order to apply the criterion better, the influences of sampling initial angle, the main parameters R and S of the criterion, the differential current threshold to the criterion are analyzed. The presented inference is also strictly proved. Furthermore, the assumption to optimize the sampling value based differential protection is put forward, and its availability is demonstrated.

**Keywords:** sampling value based differential protection; sampling initial angle; transient impulse inference