

# 变压器差动保护的三种比率制动方式及其系数整定的研究

金瑞<sup>1</sup>, 鲍斌<sup>2</sup>, 时伯年<sup>1</sup>

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司系统分析与控制研发部, 北京 100085;

2. 东北电力调控分中心, 辽宁 沈阳 110180)

**摘要:** 变压器差动保护的比率制动方式不同, 其灵敏度和安全性也不同。不同厂家的保护装置同时作为变压器的主保护时, 因为采用不同的比率制动方式, 即使按照推荐定值整定比率制动系数, 保护的動作性能也有差异。比较了国内外广泛应用的三种比率制动方式: MAX 方式、AVE 方式和 PHA 方式。在具体算例中, 比较了三种比率制动方式的灵敏度和安全性。发现即使取厂家推荐的比率制动系数, 在区外某处发生故障导致 CT 一定程度饱和时, 采用某些制动方式的差动保护也不能避免误动, 需要适当调整比率制动系数的定值, 或采用额外的故障类型判据闭锁出口。

**关键词:** 变压器保护; 差动保护; 比率制动系数; 整定; 灵敏度; 安全性

## Research on three kinds of percentage restraint methods and their coefficient setting of transformer differential protection

JIN Rui<sup>1</sup>, BAO Bin<sup>2</sup>, SHI Bonian<sup>1</sup>

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., System Analysis & Control Dept., Beijing 100085, China;

2. Northeast China Power Dispatching Center, Shenyang 110180, China)

**Abstract:** The sensitivity and security of transformer differential protection are not the same due to different percentage restraint methods. When IEDs from various suppliers are both applied as main protections for a transformer, since different percentage restraint methods are applied, they will not trip coherently when they are set default percentage restraint coefficients. The paper first compares three percentage restraint methods applied widely at home and abroad, i.e. MAX, AVE and PHA. Besides, via a calculation example, it compares sensitivity and security of the three methods. It is found that when default percentage restraint coefficients are set, differential protections with certain percentage restraint method will not avoid mal-operation when external faults occurs at certain location with CT saturation to some extent. Percentage restraint coefficients should be adjusted to suitable value, or additional fault type criteria should be added to block tripping.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900500) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2013AA050104).

**Key words:** transformer protection; differential protection; percentage restraint coefficient; setting; sensitivity; security

## 0 引言

目前, 差动保护作为变压器的主保护得以广泛应用。基于安匝平衡定律的比率制动差动保护, 因不需要躲负荷电流, 不易受系统运行方式变化的影响, 不需躲区外故障, 相比(带方向的)过流保

护和距离保护, 有更高的灵敏度。但需要防止区外故障 CT 饱和引起的误动<sup>[1-2]</sup>, 保证差动保护的安全性。

当保护区内的差动电流和制动电流的比值在特性曲线的動作区时, 差动保护才能動作。不同比率制动方式的差动电流计算公式相同, 即流入保护区内各支路电流的相量和, 而制动电流的计算公式各不相同。不同制动方式即使取厂家推荐的比率制动系数, 灵敏度和安全性也有差异。文献

**基金项目:** 国家重点研发计划资助(2016YFB0900500); 国家高技术研究发展计划资助(863 计划)(2013AA050104)

[3]比较了应用其中两种制动方式的保护在某一种接线方式下的灵敏度和安全性。

本文首先列举了不同接线方式下三种制动方式的制动电流( $I_r$ , 下同)及差动电流和制动电流的比值( $I_d/I_r$ , 下同)的计算公式, 并分析了影响  $I_r$  和  $I_d/I_r$  的各个因素。随后给出了三种制动方式比率制动系数的最大值和最小值的整定建议。在最后的计算算例中, 根据不同故障点的计算结果分析了各制动方式的灵敏度和安全性。对于其他接线方式, 可以参考本算例做类似分析。

1 常见变压器差动保护制动方式的比较

1.1 常见的变压器差动保护制动方式

目前常见的制动电流选取方法主要有三种: 如 ABB 公司的 RET670 系列保护采用的 MAXIMUM (MAX)计算方式, AREVA 公司的 MICOM P64X 系列保护和 SIEMENS 公司的 7UT613/63x 系列保护则采用 AVERAGE(AVE)计算方式, 而国内的保护厂家多数采用 PHASOR(PHA)计算方式。这三种方式的制动电流计算分别如式(1)一式(3)。

$$\max \{|I_1|, \dots, |I_n|\} \tag{1}$$

$$k \sum_{i=1}^n |I_i| \tag{2}$$

$$\frac{1}{2} \left| I_p - \sum_{i=1, i \neq p}^n I_i \right| \tag{3}$$

式中:  $I_1$ 、 $I_n$ 、 $I_i$ 、 $I_p$  分别为经过相位补偿后各支路换算到基准侧的相电流,  $I_p$  为所有支路中最大的相电流;  $n$  为不同变压器接线方式对应的  $n$  个支路;  $k$  是 AVE 方式的换算系数。

1.2 正常情况和不考虑饱和的区外故障

正常运行时, 对于  $n \leq 3$  的接线方式, MAX 方式、 $k=0.5$  的 AVE 方式和 PHA 方式的  $I_r$  相同, 都等于流入支路(或流出支路)的总电流  $I_e$ , 如表 1 所示。

表 1 正常运行时三种制动方式的  $I_r(n \leq 3)$  的接线方式

Table 1  $I_r$  of the three restraint methods when normal operation (branch number  $n \leq 3$ )

典型接线方式( $n$ 分支)	MAX	AVE $k=0.33$	AVE $k=0.5$	AVE $k=1$	PHA
	$I_e$	$0.67I_e$	$I_e$	$2I_e$	$I_e$

对于  $n > 3$  的接线方式, 正常运行时, MAX 方

式和 AVE 方式的  $I_r$  如表 2 和表 3 所示。

表 2 正常运行时 MAX 方式的  $I_r(n > 3)$  的接线方式

Table 2  $I_r$  of MAX method when normal operation (branch number  $n > 3$ )

典型接线方式( $n$ 分支)	$I_r$
	$\max \{ I_1 , \dots,  I_n \}$

表 3 正常运行时 AVE 方式的  $I_r(n > 3)$  的接线方式, 同上表

Table 3  $I_r$  of AVE method when normal operation (branch number  $n > 3$ )

典型接线方式( $n$ 分支)	$I_r$
AVE $k=0.33$	$0.67I_e$
AVE $k=0.5$	$I_e$
AVE $k=1$	$2I_e$

对于  $n > 3$  的接线方式, 正常运行时 PHA 方式的  $I_r$  为  $\frac{1}{2} \left| I_p - \sum_{i=1, i \neq p}^n I_i \right|$ 。

对于不考虑 CT 饱和的区外故障, 只需将表 1 和表 3 的  $I_e$  用穿越电流  $I_f$  取代即可。为避免变压器不同接线组别的星角变换对计算结果产生影响<sup>[4]</sup>, 本文中的故障特指三相故障。

1.3 不考虑 CT 饱和的区内故障

区内故障时, MAX 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$  如表 4 所示。

表 4 区内故障时, MAX 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$

Table 4  $I_d/I_r$  and  $I_r$  of MAX method when inside fault occurs

典型接线方式( $n$ 分支)	$I_d/I_r$	$I_r$
		$\frac{\sum_{i=1}^n  I_i }{\max \{ I_1 , \dots,  I_n \}}$
		$\max \{ I_1 , \dots,  I_n \}$

可以看出, MAX 方式的  $I_r$  只和最大电流支路相关。当最大支路电流一定时, 增加电源数量, 或改变其他支路电流,  $I_r$  不变。 $I_d/I_r$  随支路数量、各支路电流大小变化。

区内故障时, AVE 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$  如表 5 所示。

表 5 区内故障时, AVE 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$   
(接线方式同上表)

Table 5  $I_d/I_r$  and  $I_r$  of AVE method when inside fault occurs  
(the same connections with last figure)

$k$ 值	$I_d/I_r$	$I_r$
$k=0.33$	303%	$k \sum_{i=1}^n  I_i $
$k=0.5$	200%	
$k=1$	100%	

可以看出, AVE 方式的  $I_r$  和支路数量、所有支路电流大小相关。  $I_d/I_r$  不随支路数量和各支路电流大小而变化, 比值恒为  $1/k$ 。

区内故障时, PHA 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$  如表 6 所示。

表 6 区内故障时, PHA 方式得到的  $I_d/I_r$  和  $I_r$   
(接线方式同上表)

Table 6  $I_d/I_r$  and  $I_r$  of PHA method when inside fault occurs  
(the same connections with last figure)

$I_d/I_r$	$I_r$
$\frac{\sum_{i=1}^n  I_i }{\frac{1}{2} I_p - \sum_{i=1, i \neq p}^n I_i}$	$\frac{1}{2} I_p - \sum_{i=1, i \neq p}^n I_i$

可以看出, PHA 方式的  $I_r$  和支路数量、所有支路电流大小相关。  $I_d/I_r$  随支路数量、各支路电流大小而变化。

### 1.3.1 不同 $k$ 值 AVE 方式的灵敏度和安全性

可以通过坐标变换的方式比较相同比率制动系数(如  $s=0.25$ )、不同  $k$  值的 AVE 方式的灵敏度, 如图 1 所示。

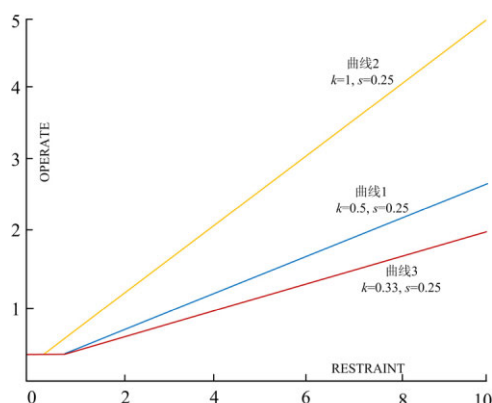


图 1 不同  $k$  值的 AVE 方式的曲线对比

Fig. 1 Curve comparison of AVE method with various  $k$

以  $s=0.25$ 、 $k=0.5$  的特性曲线为基准曲线 1, 以

$(I_r', I_d')$  为坐标的曲线 1 的方程为  $I_d' = sI_r'$ , 以  $s=0.25$ 、 $k=1$  的特性曲线为对比曲线 2, 其特性方程为  $I_d = sI_r$ 。两坐标系有如下关系:

$$\begin{cases} I_r' = 0.5I_r \\ I_d' = I_d \end{cases} \quad (4)$$

因此曲线 2 转换到坐标系  $(I_r', I_d')$  的方程为  $I_d' = 2sI_r'$ 。

同理,  $s=0.25$ 、 $k=0.33$  的对比曲线 3 转换到坐标系  $(I_r', I_d')$  的方程为  $I_d' = 0.67sI_r'$ 。

可以看出, 曲线 2 和曲线 3 转换到曲线 1 的坐标系后, 分别是曲线 1 斜率的 2 倍和 0.67 倍, 即相当于 50% 和 16.8% 的斜率, 如图 1 所示。由此可知, 不同接线方式发生区内故障时, 对于不同  $k$  值的 AVE 方式,  $k$  值越小灵敏度越高。

### 1.3.2 PHA 方式和 AVE 方式的灵敏度和安全性

根据表 5 和表 6 可知, 不同接线方式发生区内故障时, PHA 方式的  $I_r$  将出现相量相减的情况, 因此比  $k=0.5$  的 AVE 方式的灵敏度更高。

### 1.3.3 AVE 方式和 MAX 方式的灵敏度和安全性

发生区内故障时, 对于两个分支的变压器, MAX 方式的  $I_r$  总是大于等于  $k=0.5$  的 AVE 方式, 因此  $k=0.5$  的 AVE 方式的灵敏度比 MAX 方式更高, 如图 2 所示。

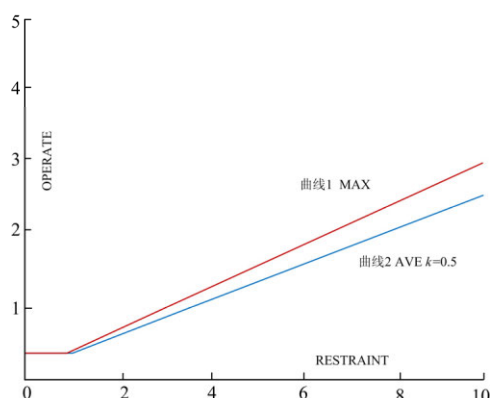


图 2  $k=0.5$  的 AVE 方式和 MAX 方式的曲线对比

Fig. 2 Curve comparison of AVE and MAX methods with  $k=0.5$

同理可分析对于三个分支的变压器,  $k=0.33$  的 AVE 方式比 MAX 方式的灵敏度更高。

## 2 比率制动系数的整定

整定差动保护时, 将正常运行时  $I_d/I_r$  的最大值作为比率制动系数的最小值, 将区内故障  $I_d/I_r$  的最小值作为比率制动系数的最大值, 并兼顾区内故障时保护的灵敏度和区外故障 CT 饱和时保护的安全性<sup>[5]</sup>。

## 2.1 比率制动系数最小值

正常运行情况下, 变压器差动保护有一定的不平衡电流, 主要由三部分组成。

1) 固有差动电流, 即和变压器流入电流(或流出电流)大小无关的差动电流; 主要是变压器的励磁电流, 通常占变压器额定电流的 1%~4%。

2) 比例差动电流, 即和变压器流入电流(或流出电流)成比例的差动电流; 主要由变压器调压导致平衡系数的误差、CT 的稳态误差和保护装置的测量误差引起。

3) CT 暂态误差导致的差动电流, 只有通过时域仿真才能确定数值。

比率制动系数的最小值可以参考以下因素导致的  $I_d/I_r$  误差: 励磁电流引起的误差  $\delta_1$ , 通常是 1%~4%; CT 稳态误差  $\delta_2$ , 通常不超过 3%; 保护测量误差的最大值  $\delta_3$ , 通常是 5%; 变压器调压导致平衡系数的误差  $\delta_4$ , 无载调压的范围通常在  $\pm 5\%$  以内<sup>[6]</sup>, 有载调压的调整范围可达 30%<sup>[6]</sup>。

稳态差动电流相对于实际运行电流的误差为

$$\delta = [(1+\delta_1)(1+2\delta_2)(1+\delta_3)(1+\delta_4)-1] \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\delta_1$  和实际运行电流没有比例关系, 考虑到变压器在正常情况下的运行电流和额定电流相近, 在此把  $\delta_1$  也当成比例差动电流处理;  $2\delta_2$  考虑了所有流入支路的 CT 误差和所有流出支路的 CT 误差分别取正值和负值的情况。

如果只考虑固有差动电流和比例差动电流部分, 对于  $n=2$  的接线方式, MAX、AVE 和 PHA 方式的比率制动系数最小值(即稳态差动电流相对于不同方式的制动电流)分别由式(6)和式(7)<sup>[3]</sup>及式(8)求得。

$$s_{\text{MAX}} = \delta \quad (6)$$

$$s_{\text{AVE}} = \left[ \frac{100\delta}{(200-100\delta) \times k} \right] \times 100\% \quad (7)$$

$$s_{\text{PHA}} = \left[ \frac{100\delta}{\frac{1}{2}(200-100\delta)} \right] \times 100\% \quad (8)$$

对于  $n \geq 3$  的接线方式, MAX、AVE 和 PHA 方式的比率制动系数最小值分别由式(9)—式(11)求得。

$$s_{\text{MAX}} = \frac{100\delta}{100I_{p^*} - 100\delta} \quad (9)$$

$$s_{\text{AVE}} = \left[ \frac{100\delta}{(200-100\delta) \times k} \right] \times 100\% \quad (10)$$

$$s_{\text{PHA}} = \frac{100\delta}{\frac{1}{2}(200I_{p^*} - 100\delta)} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $s_{\text{MAX}}$ 、 $s_{\text{AVE}}$ 、 $s_{\text{PHA}}$  是只考虑稳态各项误差的比率制动系数;  $\delta$  是稳态差动电流相对于实际运行电流的误差;  $k$  为 AVE 方式的换算系数;  $I_{p^*}$  是最大支路电流归算到基准侧的标么值。

式(6)—式(11)中, 假设各误差都是负值, 因此减少了流入或流出支路的电流值, 公式得到最大值。

式(9)中, 假设误差  $\delta$  发生在最大电流支路  $p$  上, 公式得到最大值。

## 2.2 比率制动系数最大值

需要根据系统的实际情况, 根据表 4—表 6 的公式计算出区内故障时  $I_d/I_r$  的最小值。各特性曲线的比率制动系数应低于此值。

## 3 算例分析

以图 3 所示的系统为例, 分析区外故障导致 CT 一定程度饱和时, 比率制动系数的取值。

CT 饱和程度和一次时间常数、二次时间常数及二次负载等参数有关<sup>[7]</sup>。除非进行时域暂态仿真分析, 否则难以确定 CT 的饱和程度<sup>[8-10]</sup>。此处假设只有最大电流支路的 CT 发生了饱和, 且传变了 0.5 倍的电流(即 CT 传变率  $\mu^{[11]}=0.5$ )。计算短路电流时, 取全系统的基准容量等于变压器额定容量, 取各级基准电压等于变压器各侧额定电压, 因此各级基准电流即为变压器各侧额定电流。

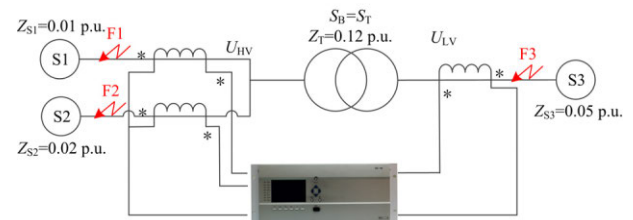


图 3 变压器发生区外故障算例

Fig. 3 Calculation example for a transformer when external fault occurs

表 7 的最小值根据式(9)—式(11)计算得来, (假设图 3 的变压器采用有载调压方式, 调整范围为  $\pm 10\%$ ), MAX 和 PHA 方式的最大值在单电源供电发生区内故障时得到。

### 3.1 三种制动方式的安全性分析

比较表 8 的数据可知, 发生区外故障 CT 饱和时, MAX 方式的安全性在不同故障点差异较大: 在双断路器侧, 相比于  $k=0.5$  的 AVE 方式和 PHA 方式,  $I_r$  是没有流经变压器的支路电流, 数值最大,



表 7 三种制动方式的  $I_d/I_r$  的最大值和最小值Table 7 Maxima and minimum of  $I_d/I_r$  of the three methods

制动方式	最小值	最大值
MAX	37%	100%
AVE $k=0.33$	47%	303%
AVE $k=0.5$	31%	200%
AVE $k=1$	16%	100%
PHA	31%	200%

表 8 发生区外故障 CT 饱和时三种制动方式计算的  $I_r$  和  $I_d/I_r$ Table 8  $I_r$  and  $I_d/I_r$  of the three methods when external fault occurs and CT saturates

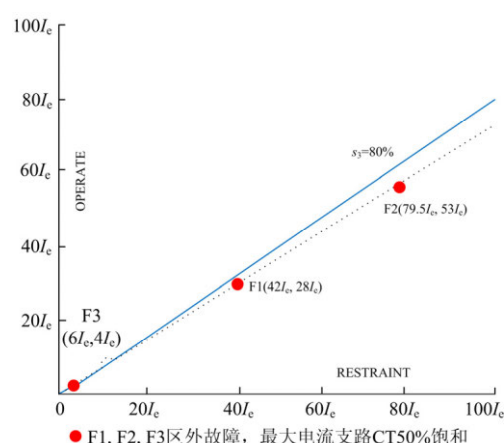
制动方式	F1		F2		F3	
	$I_r$	$I_d/I_r$	$I_r$	$I_d/I_r$	$I_r$	$I_d/I_r$
MAX	$50I_e$	56%	$100I_e$	53%	$5I_e$	80%
AVE $k=0.33$	$28I_e$	100%	$53I_e$	100%	$4I_e$	100%
AVE $k=0.5$	$42I_e$	67%	$80I_e$	67%	$6I_e$	67%
AVE $k=1$	$84I_e$	33%	$159I_e$	33%	$12I_e$	33%
PHA	$36I_e$	78%	$74I_e$	72%	$3I_e$	133%

$I_d/I_r$  最小, 安全性最高。而在单断路器侧,  $I_d/I_r$  却达到 80%。而根据表 7 得知, MAX 方式的比率制动系数需要设置在 100% 以下。甚者, 如果 S1 和 S2 的系统阻抗相同, 则向区外故障点 F3 提供等值电流, 这时  $I_d/I_r$  可达 100%。在这种情况下, MAX 方式不能保证安全性, 需要通过特有的负序电流相关的判据闭锁出口; 特定  $k$  值的 AVE 方式在不同区外故障点的安全性相同; 相比  $k=0.5$  的 AVE 方式和 MAX 方式, PHA 方式在各故障点的  $I_r$  最小,  $I_d/I_r$  最大, 因此安全性最低, 需要适当调整比率制动系数的定值, 或通过其他判据闭锁出口。近几年相关的判据研究可参考文献[12-14]。其中, 文献[12]提出了基于 Hilbert 变换的抗 CT 饱和的变压器故障识别的新方法; 文献[13]通过识别故障电流一周波内满足比率制动特性与间断点的总采样点数识别故障类型; 文献[14]提出了基于差电流半周积分特征的 CT 饱和识别办法, 用于区分内部故障和 CT 饱和。

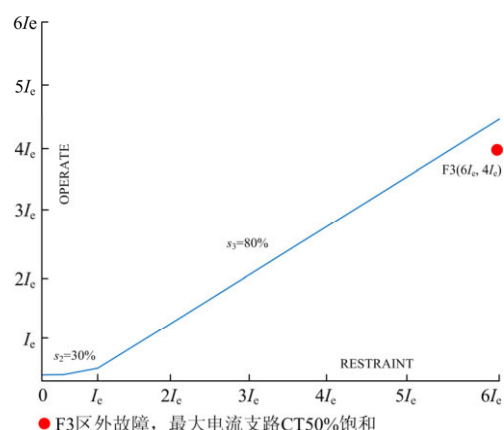
此算例中的 MAX 方式、 $k=0.5$  及  $k=1$  的 AVE 方式的数据和文献[3]的算例数据相符。

### 3.2 三折线比率制动系数的整定

为了兼顾保护的灵敏度和安全性, 三折线是目前保护厂家普遍采用的比率制动特性。对于  $k=0.5$  的 AVE 方式, 厂家推荐的动作电流门槛值为  $0.2I_e$ , 制动电流拐点为  $I_e$ , 二段的比率制动系数为 30%, 三段的比率制动系数为 80%, 如图 4 和图 5 所示。

图 4 三折线比率制动系数的整定( $k=0.5$  的 AVE 方式)Fig. 4 Setting of percentage restraint coefficient of the three slope (AVE method with  $k=0.5$ )

对于区外故障 F3, 变压器的阻抗限制了短路电流, 因此 F3 的  $I_r$  比 F1 和 F2 的  $I_r$  小很多。可以看出, 对于 AVE 方式, 按照厂家推荐定值刚好能避免 F3 故障且最大电流支路 CT50% 饱和时的误动, 如图 5。

图 5 放大的三折线( $k=0.5$  的 AVE 方式)Fig. 5 Three slope with reduced axis (AVE method with  $k=0.5$ )

对于其他  $k$  值的 AVE 方式, 可以调整比率制动系数和分界点的制动电流定值, 使保护达到同样的灵敏度和安全性。例如, 可以把  $k=0.5$  的 AVE 方式的比率制动系数的 0.5 倍、制动电流拐点的 2 倍作为  $k=1$  的 AVE 方式的定值, 达到和  $k=0.5$  的 AVE 方式相同的灵敏度和安全性。

对于 PHA 方式, 厂家推荐的动作门槛值为  $0.6I_e$ , 一段的比率制动系数为 20%, 二段的比率制动系数为 50%, 三段的比率制动系数为 70%, 两个制动电流拐点分别为  $0.6I_e$  和  $5I_e$ , 如图 6。

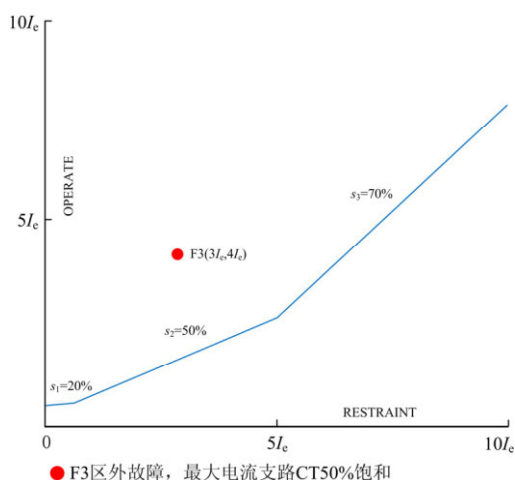


图 6 三折线比率制动系数的整定(PHA 方式)

Fig. 6 Setting of percentage restraint coefficient of the three slope (PHA method)

由图 6 可以看出, 对于 PHA 方式, 二段斜率 50% 不能避免 F3 故障且最大电流支路 CT50% 饱和时的误动。需要调整二段的斜率至 137% 以上, 或采用额外的故障判据闭锁出口。

对于 MAX 方式, 厂家推荐的动作电流门槛值为  $0.25I_e$ , 制动电流拐点为  $1.25I_e$ , 二段的比率制动系数整定为 40%, 三段的比率制动系数整定为 80%, 如图 7 所示。

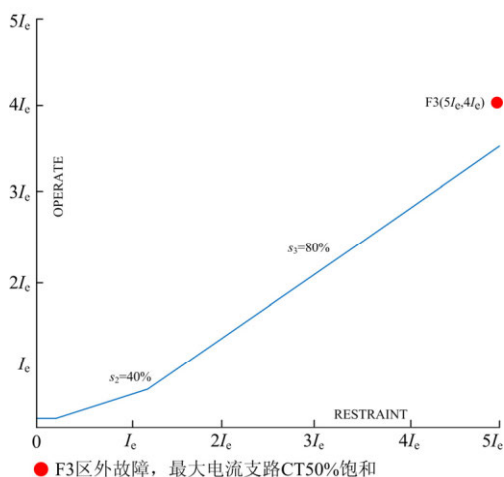


图 7 三折线比率制动系数的整定(MAX 方式)

Fig. 7 Setting of percentage restraint coefficient of the three slope (MAX method)

由图 7 可以看出, 对于 MAX 方式, 三段的斜率 80% 不能避免 F3 故障且最大电流支路 CT50% 饱和的误动, 需要调整三段的斜率至 94% 以上, 或采用额外的故障判据闭锁出口。

## 4 结语

首先列举了不同变压器接线方式下, 正常运行、不考虑 CT 饱和的区外故障以及区内故障时, MAX 方式、AVE 方式和 PHA 方式的  $I_r$  和  $I_d/I_r$  的计算公式, 并分析了影响  $I_r$  和  $I_d/I_r$  的各个因素。比较了不同接线方式发生区内故障时, 不同  $k$  值的 AVE 方式的灵敏度、 $k=0.5$  的 AVE 方式和 PHA 方式的灵敏度, 以及特殊接线方式下, MAX 方式和相应  $k$  值的 AVE 方式的灵敏度。随后给出了各制动方式比率制动系数最大值和最小值的整定建议。

在具体算例中, 考虑了一定程度的 CT 饱和, 根据各方式对应的公式计算出不同区外故障点的  $I_r$  和  $I_d/I_r$ , 并调整了曲线的定值。

本算例中, 发生区外故障时, MAX 方式的安全性在不同故障点差异较大: 在双断路器侧, 相比于  $k=0.5$  的 AVE 方式和 PHA 方式, 能提供较大的制动电流, 安全性较高。而在单断路器侧却难以区分区内故障和区外故障; 特定  $k$  值的 AVE 方式在不同故障点的安全性相同; 相比  $k=0.5$  的 AVE 方式和 MAX 方式, PHA 方式在各点的制动电流最小, 因此安全性最低。

比率制动系数取值小可以及时发现变压器匝间短路<sup>[15-16]</sup>, 防止事故蔓延造成更大损失。比率制动系数取值大可以避免外部故障 CT 一定程度饱和引起的保护误动。因此, 需要根据系统实际情况和不同制动方式的特点, 选择比率制动系数的最佳值。

## 参考文献

- [1] WU Yahui, DONG Xinzhou, SOHRAB M. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [2] 戚宣威, 李露, 黄晓明, 等. 区外故障导致变压器电流互感器饱和及差动保护误动问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 44-51.
- [3] THOMPSON M J. Percentage restrained differential, percentage of what?[C] // 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 11-14, 2011, Texas, USA, 2011: 278-289.

- [4] 冯国东. 变压器低压侧小区差动保护的思考[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 79-83.  
FENG Guodong. Thoughts on the low voltage side transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 79-83.
- [5] 杨恒坤, 邓祥力, 王传启, 等. 采样值差动保护安全性和灵敏度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 107-113.  
YANG Hengkun, DENG Xiangli, WANG Chuanqi, et al. Research on security and sensitivity of sampled-value differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 107-113.
- [6] 戈东方. 电力工程电气设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1979.
- [7] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于频数分布的防止变压器差动保护误动的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 15-21.  
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. A new algorithm based on frequency distribution for avoiding the mal-operation of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 15-21.
- [8] 宁铎, 尤磊, 李英春, 等. 变压器差动保护动作特性的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 99-106.  
NING Duo, YOU Lei, LI Yingchun, et al. Simulation research on the operating characteristic of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 99-106.
- [9] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [10] 王振浩, 王学斌, 李国庆, 等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 15-22.  
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, LI Guoqing, et al. Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 15-22.
- [11] 林湘宁, 刘沛, 徐韬. 一种新的差动保护动作行为分析方法—原理篇[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 45-50.  
LIN Xiangning, LIU Pei, XU Tao. A novel analysis methodology of differential protection operation behavior, part one, principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 45-50.
- [12] 公茂法, 夏文华, 张晓明, 等. 基于 HHT 的抗 CT 饱和的变压器故障识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 65-70.  
GONG Maofa, XIA Wenhua, ZHANG Xiaoming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 65-70.
- [13] 陈继瑞, 张营伟, 邓茂军, 等. 一种同名相转换性故障变压器差动保护防拒动的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 74-78.  
CHEN Jirui, ZHANG Yingwei, DENG Maojun, et al. Research of a transformer differential protection against refusing action about the same phase transformation faults[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 74-78.
- [14] 刘益青, 高伟聪, 王成友, 等. 基于差电流半周积分特征的电流互感器饱和和识别方[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2889-2895.  
LIU Yiqing, GAO Weicong, WANG Chengyou, et al. Detection method for current transformer saturation based on characteristic of differential current by half-cycle integral algorithm[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2889-2895.
- [15] 熊小伏, 王婧, 陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 112-115.  
XIONG Xiaofu, WANG Qiang, CHEN Xingtian. A protection method of transformer inter-turn short circuit based on the variation of current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 112-115.
- [16] 唐起超, 王赞基, 王维俭. 多绕组电力变压器内部短路稳态分析——建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 44-47.  
TANG Qichao, WANG Zanjie, WANG Weijian. Steady-state analysis of internal short circuits of multi-winding power transformer—modeling and simulations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 44-47.

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2017-10-26

作者简介:

金 瑞(1984—), 女, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: jinrui@sf-auto.com

鲍 斌(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: 13904020105@163.com

时伯年(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定及广域保护。E-mail: shibonian@sf-auto.com

(编辑 魏小丽)