

# 振荡闭锁期间不对称故障的快速识别方法

袁兆强<sup>1</sup>, 吴强<sup>1</sup>, 易传炳<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北随州市曾都供电公司, 湖北 随州 441300)

**摘要:** 针对基于负序电流幅值加零序电流幅值与正序电流幅值之比的识别方法(简称序电流比值法)存在有时开放保护的延时太长的问題, 提出了基于负序电流、零序电流幅值和与正序电流幅值之比的变化率的识别方法(简称比值变化率法)。论文以一个双端电源电网为例, 对比值变化率法与序电流比值法进行了对比研究。结果表明, 文章提出的比值变化率法除个别情况比序电流比值法开放保护的时间稍长外, 绝大多数情况都比序电流比值法开放保护的时间要短得多。文章建议, 将比值变化率法和序电流比值法共同作为振荡中发生不对称短路故障的综合判据, 这样可以大大提高振荡中发生不对称短路故障时开放保护的速度。

**关键词:** 距离保护; 振荡闭锁; 不对称短路故障; 开放保护; 微机保护

## Fast identification of asymmetry fault during power swing blocked

YUAN Zhao-qiang<sup>1</sup>, WU Qiang<sup>1</sup>, YI Chuan-bing<sup>2</sup>

(1. Department of Electric Engineering and Information Technology, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Suizhou Zengdu Power Supply Co., Suizhou 441300, China)

**Abstract:** That the earlier method of value of negative-sequence current module and zero-sequence current module dividing positive-sequence current module delays longer time sometimes is indicated. The paper proposes a method of ratio of value of negative-sequence current module and zero-sequence current module dividing positive-sequence current module in order to quickly identifies asymmetry fault during power swing. The paper uses a double sources electrical network as an example, and a research of comparing the proposed method with the earlier method for the delay of enabling relay protection is established. The result indicates that the proposed method has much more short delay than earlier method in bulk circumstances except for individual. It suggests that a new synthesis criterion of two methods for enabling relay protection may be more available, both of one acts and the relay protections are enabled. In this way, the speed of enabling relay protection would be advanced enormously during power swing blocked.

**Key words:** distance relay protection; power swing block; asymmetry short circuit fault; enabling relay protection; microcomputer-based protection

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)08-0006-06

## 0 引言

在距离保护中, 阻抗元件在电力系统振荡时有可能误动作(若振荡中心位于保护范围内), 因此, 必须设置振荡闭锁模块。当电力系统发生振荡时, 程序进入振荡闭锁模块, 将阻抗元件的 I、II 段闭锁。在振荡闭锁期间, 如果区内发生故障, 应当尽快解除闭锁, 开放保护, 使保护能够快速将故障线路切除。实现这一目的的关键是如何在振荡期间快速识别短路故障, 一是如何快速识别不对称短路故障, 二是如何快速识别对称短路故障。本文主要探

讨前者。

## 1 振荡期间不对称短路的识别方法

### 1.1 利用负序分量的识别方法<sup>[1,2]</sup>

电力系统全相振荡时, 三相是对称的, 没有负序分量, 而发生不对称短路时, 系统中有负序电流和负序电压出现。因此, 可以利用负序分量的有无来识别振荡与不对称短路<sup>[1~3]</sup>。这种方法的主要问题是, 为了躲负序过滤器的不平衡输出, 负序分量的定值较大; 另一方面, 如果短路发生在  $\delta \approx 180^\circ$  时的振荡中心附近, 由于短路前电压很低, 因此负序分量也很小, 难以区别短路故障。所以, 这种方法已经很少使用了。

基金项目: 湖北省教育厅重点项目资助(D200513009)

## 1.2 利用电流幅值的识别方法<sup>[3,4]</sup>

振荡期间发生不对称短路时, 三相电流大小不等; 如果是接地短路, 同时还会出现较大的零序电流。因此, 可以利用三相电流不等和零序电流大小这两个特点来识别振荡中的不对称短路故障, 其判据为:

$$I_{\varphi 1-\max} > K_{\phi} I_{\varphi 2-\min} \quad (K_{\phi} = 1.8) \quad (1)$$

$$3I_0 > K_0 I_{\varphi-\max} \quad (K_0 = 0.6) \quad (2)$$

式中:  $\varphi 1$ 、 $\varphi 2$  表示 A 相、B 相或 C 相, 但  $\varphi 1$ 、 $\varphi 2$  应取不同相;  $I_{\varphi 1-\max}$ 、 $I_{\varphi-\max}$  为流过保护的最大相电流,  $I_{\varphi 2-\min}$  为流过保护的最小相电流;  $3I_0$  为流过保护的 3 倍零序电流。系统振荡时, 三相是对称的, 无零序电流, 因此, 式 (1) 和式 (2) 均不成立, 不开放保护; 振荡中 ( $|\delta| < 60^\circ$ ) 发生不对称短路时, 式 (1) 和式 (2) 一般会有 1 个或 2 个成立, 能够正确开放保护; 在振荡功角  $|\delta| > 120^\circ$  期间, 若短路点位于振荡中心与保护安装点之间时, 也能够正确开放保护。

这种方法原理简单, 计算量小, 不受振荡时频率变化的影响。但是, 在振荡功角  $|\delta| > 120^\circ$  期间, 若短路点位于振荡中心远离保护安装侧以外时, 式 (1) 和式 (2) 均不成立, 不会开放保护, 只有等待  $|\delta| < 60^\circ$  以后才会开放保护, 而且有时等待时间会较长 (接近 1s)。

## 1.3 序电流比值法<sup>[5,6]</sup>

序电流比值法就是利用负序、零序电流幅值和与正序电流幅值之比识别振荡中发生不对称故障的方法。

该方法提出了系统振荡中发生不对称故障时, 开放保护的条件是:

$$\gamma = \frac{|I_0| + |I_2|}{|I_1|} \geq m, \quad (3)$$

式中:  $m$  取 0.66。

系统振荡时, 无负序和零序电流, 式 (3) 不成立; 振荡期间发生不对称短路时, 若  $\delta$  角不大,  $\gamma$  元件动作, 能够正确开放保护。

这种方法原理简单, 计算量小, 容易实现, 因此在国内获得了广泛应用。但是, 这种方法在振荡功角  $\delta$  较大时 (如接近  $180^\circ$ ), 在某些不对称短路故障情况下保护开放的延时可能过长 (有可能会超过 1s)。

## 1.4 其他新型识别方法

随着小波变换、人工神经网络等理论在电力系

统继电保护领域中的应用研究逐步深入, 出现了很多新的识别振荡期间发生不对称短路的方法, 其中比较典型的小波变换识别方法见文献 [7, 8], 神经网络识别方法见文献 [9]。

文献 [7~8] 利用小波变换将电流分解为低频部分 (平滑版本) 和高频部分 (细节版本)。高频部分在振荡时很小, 而短路时很大。因此, 可以利用高频部分作为识别振荡期间发生不对称短路的依据。文献 [9] 利用 BP 神经网络来提取振荡中发生短路故障的突变量, 并以此作为神经网络的特征量来识别振荡中的不对称短路。

这些新型的识别方法一般都能够准确地区分纯振荡与纯故障, 对于振荡期间发生的各种短路故障也能准确识别, 是一类很有发展前景的方法。但是, 它们一般都还处在研究和探索阶段, 还没有成功地应用到微机保护的工业产品中去<sup>[10]</sup>。

## 2 序电流比值法和比值变化率法原理及性能分析

比值变化率法就是基于负序、零序电流幅值和与正序电流幅值之比的变化率的识别方法。

本文通过研究有广泛应用基础的利用负序、零序电流幅值和与正序电流幅值之比的识别方法, 利用 Matlab 工具软件, 对振荡期间发生单相接地短路、两相短路以及两相接地短路的情况进行了仿真研究。在基础上, 提出了比值变化率法。

### 2.1 序电流比值识别方法

#### 2.1.1 基本方法<sup>[4]</sup>

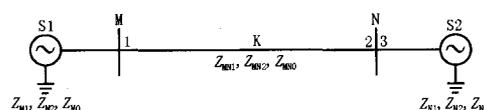


图 1 中性点直接接地电网示意图

Fig.1 Power grid of center-point earth directly

在如图 1 所示的中性点直接接地电网中, 为了简化分析过程, 假设全系统阻抗角均相等, 正序阻抗与负序阻抗相等, 零序阻抗是正序阻抗的  $K_0$  倍, 两侧系统的等值电势的幅值相等。则振荡电流为:

$$I_{swi} = \frac{E_M - E_N}{Z_{11}} = \frac{E_N}{Z_{11}} (e^{j\delta} - 1) \quad (4)$$

式中:  $Z_{11} = Z_{M1} + Z_{MN1} + Z_{N1}$ 。

故障前 K 点的电压为:

$$U_{K[0]} = E_N + I_{swi} (Z_{N1} + Z_{KN1}) = E_N + E_N (e^{j\delta} - 1) (1 - k) \quad (5)$$

$$\text{式中: } k = \frac{Z_{M1} + Z_{MK1}}{Z_{11}}$$

振荡期间, K 点发生不对称短路时, K 点的正、负、零序等值阻抗为

$$Z_{\Sigma 1} = kZ_{11} // (1-k)Z_{11} = k(1-k)Z_{11},$$

$$Z_{\Sigma 1} = k(1-k)K_0 Z_{11}.$$

在前述的假设条件下, 保护安装点 M 处的正、负、零序电流的分配系数相等, 即

$$C_{1M} = C_{2M} = C_{0M} = \frac{(1-k)Z_{11}}{Z_{11}} = 1-k \quad (6)$$

于是, 按照式 (3) 可以推导出 K 点单相接地短路时 M 处的比值  $\gamma_{\delta}^{(1)}$ 、两相短路时 M 处的比值  $\gamma_{\delta}^{(2)}$  和两相接地短路时 M 处的比值  $\gamma_{\delta}^{(1,1)}$  如下:

$$\gamma_{\delta}^{(1)} = \frac{2}{\left| 1 + \frac{k(2+K_0)(e^{j\delta}-1)}{1+(1-k)(e^{j\delta}-1)} \right|} \quad (7)$$

$$\gamma_{\delta}^{(2)} = \frac{1}{\left| 1 + \frac{2k(e^{j\delta}-1)}{1+(1-k)(e^{j\delta}-1)} \right|} \quad (8)$$

$$\gamma_{\delta}^{(1,1)} = \frac{1}{\left| 1 + \frac{1+2K_0}{1+K_0} \cdot \frac{k(e^{j\delta}-1)}{1+(1-k)(e^{j\delta}-1)} \right|} \quad (9)$$

可见, 三种不对称短路情况下的比值  $\gamma$  都与振荡时的功角  $\delta$  有关, 还与短路点的位置 (由  $k$  值反映) 有关。

不失一般性, 我们再假设  $K_0=1$ , 即假设正序阻抗与零序阻抗相等。这样式 (7)、(8)、(9) 可以简化成

$$\gamma_{\delta}^{(1)} = 2 \sqrt{\frac{[k+(1-k)\cos\delta]^2 + [(1-k)\sin\delta]^2}{[(1+2k)\cos\delta - 2k]^2 + [(1+2k)\sin\delta]^2}} \quad (10)$$

$$\gamma_{\delta}^{(2)} = \sqrt{\frac{[k+(1-k)\cos\delta]^2 + [(1-k)\sin\delta]^2}{[(1+k)\cos\delta - k]^2 + [(1+k)\sin\delta]^2}} \quad (11)$$

$$\gamma_{\delta}^{(1,1)} = \sqrt{\frac{[k+(1-k)\cos\delta]^2 + [(1-k)\sin\delta]^2}{[(1+0.5k)\cos\delta - 0.5k]^2 + [(1+0.5k)\sin\delta]^2}} \quad (12)$$

2.1.2 序电流比值随功角  $\delta$  变化的计算曲线及分析与算式 (10)、(11)、(12) 对应的比值随功角  $\delta$  变化的计算曲线如图 2、图 3 和图 4 所示。

由图 2 ~ 4 可以看出, 在同样  $k$  值、 $\delta$  角情况

下, 两相短路时的比值  $\gamma_{\delta}^{(2)}$  最小。这样, 在正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生两相短路时, 要使  $\gamma_{\delta}^{(2)} = 0.66$ ,  $\delta$  角偏离  $180^\circ$  的角度最大, 其等待延时开放保护的时间最长。以正遇  $\delta = 180^\circ$  时在  $k = 0.5$  处 (即短路点正好位于振荡中心) 发生两相短路为例, 由图 3 可见, 要使  $\gamma_{\delta}^{(2)} = 0.66$ , 对应的  $\delta$  角为  $300^\circ$  左右, 因此, 等待  $\delta$  角由  $180^\circ$  变化到  $300^\circ$  所需要等待的时间可以由下式计算出

$$t_{\text{delay}} = \frac{300^\circ - 180^\circ}{360^\circ} T_{\Delta\omega} \quad (13)$$

式中:  $T_{\Delta\omega}$  为系统振荡周期, 一般取  $T_{\Delta\omega} = 1 \sim 3 \text{ s}$ , 则可计算出所需等待的延时为  $0.33 \sim 1.0 \text{ s}$ 。同理可得当  $\delta = 180^\circ$  时在  $k = 0.9$  处 (即短路点远离振荡中心) 发生两相短路时, 需等待  $0.37 \sim 1.1 \text{ s}$ 。即当振荡周期较长时, 如  $3 \text{ s}$  时, 等待开放保护的时间将长达  $1 \text{ s}$  多, 这显然不符合快速开放保护的要求。

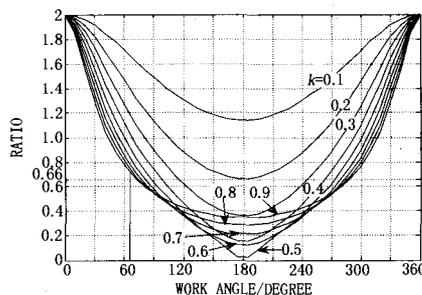


图 2 振荡中单相接地故障时  $\gamma$  随  $\delta$  变化的曲线  
Fig.2 Curve of  $\gamma$  with  $\delta$  changes while single phase grounded during power swing

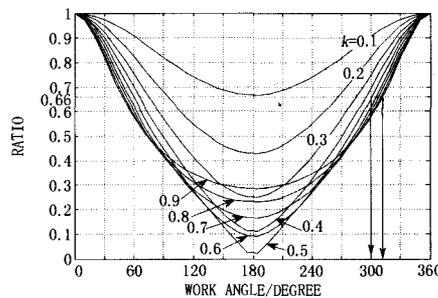


图 3 振荡中两相短路故障时  $\gamma$  随  $\delta$  变化的曲线  
Fig.3 Curve of  $\gamma$  with  $\delta$  changes while two-phase short circuit during power swing

## 2.2 比值变化率识别方法

观察图 2 ~ 图 4 可以发现, 对所有比值曲线都存在一个共同的规律, 就是只有在  $\delta = 180^\circ$  时比值  $\gamma$  对  $\delta$  的导数  $\frac{d\gamma}{d\delta} = 0$ , 其它  $\delta$  角对应的  $\frac{d\gamma}{d\delta}$  的绝对

值均大于 0。因此, 我们可以选择  $\frac{\Delta\gamma}{\Delta\delta}$  的绝对值大于某一阈值作为识别振荡期间发生不对称短路故障的判据。

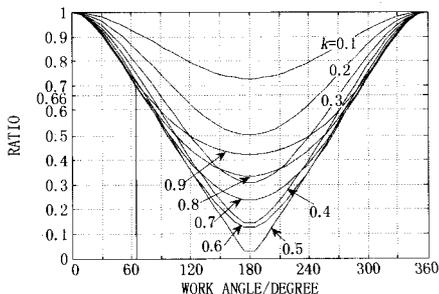


图 4 振荡中两相接地短路故障时  $\gamma$  随  $\delta$  变化的曲线  
Fig. 4 The curve of  $\gamma$  with  $\delta$  changes while two-phases short circuit and grounded during power swing

根据比值表达式 (10)、(11) 和 (12), 我们取  $\Delta\gamma$  为

$$\Delta\gamma = \gamma(\delta_k) - \gamma(\delta_{k-1}) \quad (14)$$

式中:  $\delta_k$ 、 $\delta_{k-1}$  分别为  $t_k$ 、 $t_{k-1}$  时刻对应的振荡功角;  $\gamma(\delta_k)$ 、 $\gamma(\delta_{k-1})$  分别为对应功角为  $\delta_k$ 、 $\delta_{k-1}$  时的负序、零序电流幅值和与正序电流幅值之比。

为了简化计算, 可取  $\Delta\delta$  为常数。若取

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} = M T_s, \quad (15)$$

式中:  $\Delta t$  是计算变化率的时间间隔;  $M$  是在  $\Delta t$  时间间隔内的采样点数。于是

$$\Delta\delta = \frac{2\pi}{T_{\Delta\omega}} = \frac{2\pi M}{T_s} \quad (16)$$

如果按最大振荡周期  $T_{\Delta\omega}$  为 3 s, 采样周期  $T_s$  为 1 ms

考虑,  $M$  取 15, 则  $\Delta\delta = \frac{2\pi}{200}$ 。

这样, 利用 Matlab 软件分别对振荡中发生单相接地短路、两相短路、两相短路接地情况下的比值变化率进行了计算, 结果如图 5~图 7 所示。

由图 5~图 7 可见, 若选择比值变化率的阈值为 0.1, 即振荡中又发生不对称短路的判据取为

$$\left| \frac{\Delta\gamma}{\Delta\delta} \right| > 0.1 \quad (17)$$

则在正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生不对称短路时, 要使式 (17) 满足, 最多等待  $\delta$  角摆到  $\delta = 230^\circ$  左右 (见图 7 中  $k=0.1$  的情况) 即可, 于是最大的延时只有

$$t_{\text{delay}} = \frac{230^\circ - 180^\circ}{360^\circ} T_{\Delta\omega} = 0.14 \sim 0.42 \text{ s}$$

这显然比用  $\gamma > 0.66$  作为判据开放保护的延时时间缩短了很多。

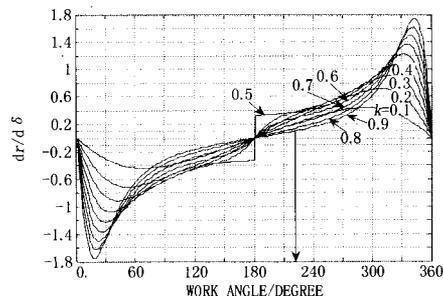


图 5 振荡中单相接地故障时  $d\gamma/d\delta$  曲线  
Fig. 5 Curve of  $d\gamma/d\delta$  while single phase grounded during power swing

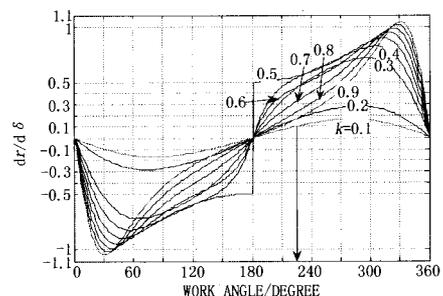


图 6 振荡中两相短路故障时  $d\gamma/d\delta$  曲线  
Fig. 6 Curve of  $d\gamma/d\delta$  while two-phase short circuit during power swing

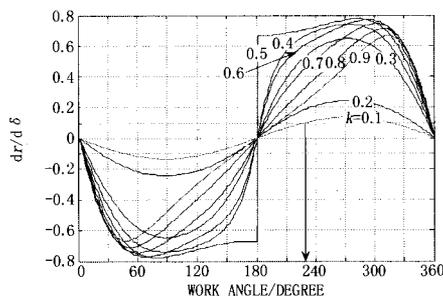


图 7 振荡中两相接地短路故障时  $d\gamma/d\delta$  曲线  
Fig. 7 Curve of  $d\gamma/d\delta$  while two-phase short circuit grounded during power swing

由于功角的变化量  $\Delta\delta$  在保护安装处不容易检测到, 因此, 判据 (17) 必须进行变换。因为  $\Delta\delta$  与  $\Delta t$  之间存在如下关系

$$\Delta\delta = \frac{2\pi}{T_{\Delta\omega}} \Delta t \quad (18)$$

所以, 有

$$\left| \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \right| = \frac{2\pi}{T_{\Delta\omega}} \left| \frac{\Delta\gamma}{\Delta\delta} \right| \quad (19)$$

于是, 振荡中发生不对称短路开放保护的条件式(17)变化为

$$\left| \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \right| > 0.1 \times \frac{2\pi}{T_{\Delta\omega}} \quad (20)$$

取最大振荡周期, 即  $T_{\Delta\omega} = 3 \text{ s}$ , 保护开放条件为

$$\left| \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \right| > 0.2 \quad (21)$$

### 3 两种识别方法的比较

#### 3.1 振荡中发生单相接地短路时的比较

比较图 2 和图 5 可见, 对于在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生单相接地短路故障情况, 要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间见表 1。

表 1 振荡中  $\delta = 180^\circ$  时发生单相接地短路时要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间

Tab.1 Delay time while  $\delta = 180^\circ$  a single phase grounded fault occurred during swing for expression (3) or expression (17)

短路位置	序电流比值法/s	比值变化率法/s	开放时间提高倍数
$k=0.1$	无延时	0.056~0.17	-
$k=0.2$	无延时	0.028~0.083	-
$k=0.3$	0.18~0.54	0.019~0.058	9.3
$k=0.4$	0.22~0.67	0.017~0.05	13
$k=0.5$	0.26~0.78	0.005~0.015	52
$k=0.6$	0.27~0.82	0.042~0.13	6
$k=0.7$	0.28~0.85	0.056~0.17	5
$k=0.8$	0.29~0.87	0.083~0.25	3.5
$k=0.9$	0.3~0.9	0.125~0.375	2.4

由表 1 可见, 在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生单相接地短路故障时, 序电流比值法除了短路故障点离保护安装侧的电源很近(有可能在保护背后)的个别情况下( $k=0.1$  和  $k=0.2$ )可以无延时地开放保护外, 大多数情况下需要等待的延时都是数百毫秒甚至接近 1 s; 而比值变化率法只需要数十毫秒, 比前者速度要快得多, 个别短路点远离保护安装点的情况(如  $k=0.9$ , 有可能在保护范围之外), 等待时间也不长(最长为 0.375 s)。

#### 3.2 振荡中发生两相短路时的比较

比较图 3 和图 6 可见, 对于在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生两相短路故障情况, 要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间见表 2。

表 2 振荡中  $\delta = 180^\circ$  时发生两相短路时要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间

Tab.2 Delay time while  $\delta = 180^\circ$  a two-phase short circuit fault occurred during swing for expression (3) or expression (17)

短路位置	序电流比值法/s	比值变化率法/s	开放时间提高倍数
$k=0.1$	无延时	0.125~0.375	-
$k=0.2$	0.236~0.708	0.07~0.208	3.4
$k=0.3$	0.264~0.792	0.022~0.067	12
$k=0.4$	0.292~0.875	0.011~0.033	26.5
$k=0.5$	0.333~1.0	0.003~0.008	111
$k=0.6$	0.347~1.042	0.015~0.046	23
$k=0.7$	0.354~1.063	0.036~0.108	9.8
$k=0.8$	0.361~1.083	0.056~0.167	6.4
$k=0.9$	0.367~1.1	0.084~0.25	4.4

由表 2 可见, 在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生两相短路故障时, 序电流比值法除了短路故障点离保护安装侧的电源很近的个别情况下( $k=0.1$ )可以无延时地开放保护外, 大多数情况下需要等待的延时都是数百毫秒甚至超过 1 s; 而比值变化率法多数情况只需要数十毫秒, 比前者速度要快很多, 少数情况需要 100~300 ms 延时不等。

#### 3.3 振荡中发生两相接地短路时的比较

比较图 4 和图 7 可见, 对于在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生两相接地短路故障情况, 要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间见表 3。

表 3 振荡中  $\delta = 180^\circ$  时发生两相接地短路时要满足式(3)和式(17)条件需要的延时时间

Tab.3 The delay time while  $\delta = 180^\circ$  a two-phase short circuit and grounded fault occurred during swing for expression (3) or expression (17)

短路位置	序电流比值法/s	比值变化率法/s	开放时间提高倍数
$k=0.1$	无延时	0.136~0.408	-
$k=0.2$	0.149~0.582	0.064~0.192	2.3
$k=0.3$	0.25~0.75	0.021~0.063	12
$k=0.4$	0.278~0.833	0.008~0.025	34.8
$k=0.5$	0.294~0.883	0.004~0.013	73.5
$k=0.6$	0.306~0.917	0.01~0.029	30.6
$k=0.7$	0.3~0.9	0.019~0.058	15.8
$k=0.8$	0.3~0.93	0.036~0.108	8.3
$k=0.9$	0.289~0.867	0.056~0.167	5.2

由表 3 可见, 在振荡中正遇  $\delta = 180^\circ$  时发生两相接地短路故障时, 序电流比值法在短路故障点离保护安装侧的电源很近的个别情况下( $k=0.1$ )可以无延时地开放保护, 对应情况下比值变化率法需要

延时 100~400 ms 左右; 大多数情况下, 序电流比值法需要等待的延时都是数百 ms 甚至接近 1 s (0.917 s); 而比值变化率法只需要数十到一百多 ms, 比序电流比值法的速度要快许多。

#### 4 综合判据建议及结论

综合判据就是将序电流比值识别法和比值变化率识别法进行综合, 将两种方法的识别结果相或作为综合判据的识别结果。

由以上的计算、分析和比较已知, 振荡中再发生不对称故障时, 比值变化率法多数情况下能够快速开放保护, 但也有个别情况需要较长的延时(如表 2 和表 3 中  $k=0.1$  的情况), 而对应情况下的序电流比值法却可以无延时开放保护。因此, 建议将比值变化率法和序电流比值法共同作为振荡中发生不对称故障时开放保护的判据, 两者中任意一个动作, 即开放保护。

采用综合判据后, 振荡闭锁期间发生不对称故障后保护的开放速度可以大大提高, 提高倍数从几倍到几十倍。特别是正遇  $\delta = 180^\circ$  时在振荡中心发生不对称短路情况下, 开放速度提高得尤为明显, 个别情况可以提高 100 多倍(如表 2 所示)。

#### 参考文献

- [1] 许正亚. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993.  
XU Zheng-ya. Fault Analysis of Power System[M]. Beijing: China Water Power Press, 1993.
- [2] 陈志梅. 系统振荡又发生故障时距离保护的動作行为分析[J]. 电力学报, 1999, 14(1): 68-71.  
CHEN Zhi-mei. Analysis of Operating Behavior of Distance Protective Relay When the Fault Happens While the Power System is Oscillating[J]. Journal of Electric Power, 1999, 14(1): 68-71.
- [3] 李钢, 隋凤海, 王善祥, 等. 振荡中不对称故障的判据[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 17-20.  
LI Gang, SUI Feng-hai, WANG Shan-xiang, et al. A Criterion for Unsymmetrical Fault During Power Swing[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(4): 17-20.
- [4] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.  
XU Zheng-ya. New Type Distance Protection of Power Line[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.
- [5] 沈国荣, 邓绍龙, 朱声石. 区分短路与振荡的新原理[J]. 电力系统自动化, 1990, 14(1): 7-12.  
SHEN Guo-rong, DENG Shao-long, ZHU Sheng-shi. The Principles to Differentiate Power Swings and Short Circuits[J]. Automation of Electric Power Systems, 1990, 14(1): 7-12.
- [6] JIAO Shao-hua, BO Zhi-qian, LIU Wan-shun, et al. New Principles to Detect Faults During Power Swing[A]. In: 7th International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Amsterdam (Holland): 2001. 515-518.
- [7] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 电力系统振荡中轻微故障识别的小波算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 39-44.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, CHENG Shi-jie. Researches on Fault Identification During Fast Power Swing with Wavelet Transform Based Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 39-44.
- [8] LIN Xiang-ning, LIU Pei, CHENG Shi-jie. Effective Transmission Line Fault Detection During Power Swing with Wavelet Transform[A]. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Singapore: 2000. 1950-1955.
- [9] 段玉倩, 贺家李. 基于人工神经网络的距离保护[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 67-70.  
DUAN Yu-qian, HE Jia-li. Distance Relay Protection Based on Artificial Neural Network[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 67-70.
- [10] 侯慧, 尹项根, 游大海. 振荡闭锁期间再故障的距离保护判别方法[J]. 继电器, 2006, 34(8): 7-12.  
HOU Hui, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai. Measures of Detecting Fault During Power Swing in Microcomputer Distance Protection[J]. Relay, 2006, 34(8): 7-12.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

袁兆强(1957-), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护和综合自动化方面教学和研究工作; E-mail: yzq@ctgu.edu.cn

吴强(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;

易传炳(1969-), 男, 工程师, 工程硕士研究生, 主要从事电力生产技术及管理工作。