

# 利用负序增量比相构成的新型微机发电机 匝间故障及振荡闭锁保护方案

宋聚忠 张项安

姚晴林

林 韩

许昌继电器研究所(461000)

合肥工业大学(230009)

福建电力局中试所(350003)

**摘要** 本文介绍了利用高性能16位单片机采用 $\Delta U_2$ 和 $\Delta I_2$ 及 $U_2$ 和 $I_2$ 两种相量比相方案相“与”为主判据并采用 $\Delta I_1$ 和 $\Delta U_1$ 比相为闭锁判据的方法来构成的保护方案,用于反应发电机匝间故障,也可反应发变组内部各种不对称故障,灵敏度高,动作速度快,在5%本支路匝间短路时,动作时间可达18~25ms,而在各种振荡情况及外部故障时,又能可靠闭锁。本方案已在国家继电器检测中心通过了各种工况下的动模试验和型式试验,已用于本文作者从事的国家“八五”攻关项目“微机发变组成套保护”装置的主保护。

**关键词** 比相 振荡 闭锁

## 概述

据分析,当发电机发生匝间短路时,其短路电流比机端三相对称短路电流还要大,对发电机危害严重。目前用于反应发电机匝间短路的最常用的方法是采用单元式横差保护,但它必须装设在中性点有6个引出端子的发电机上,因此有很大的局限性,故其它形式的发电机匝间保护又有几种,如反应负序功率方向的集成电路型等,而用微机实现的反应负序功率增量的匝间保护也已开始推出,并都有自己的优越性和局限性。这里我们介绍的利用单片机采用相量比相的方式构成的保护又有其独到之处。

下面将分别讨论不同工况下的各量的变化趋势及相位关系。

## 1 发电机内、外部发生不对称故障时的情况分析

当发电机或系统发生不对称故障时,在故障点会叠加一电压源 $\Delta E$ ,它在机端产生的电压分量为 $\Delta U$ ,产生的电流分量为 $\Delta I$ ,可分别分解出正序分量 $\Delta U_1$ 及 $\Delta I_1$ 和负序分量 $\Delta U_2$ 及 $\Delta I_2$ (不考虑零序)。下面具体讨论。

### 1.1 发电机发生匝间短路

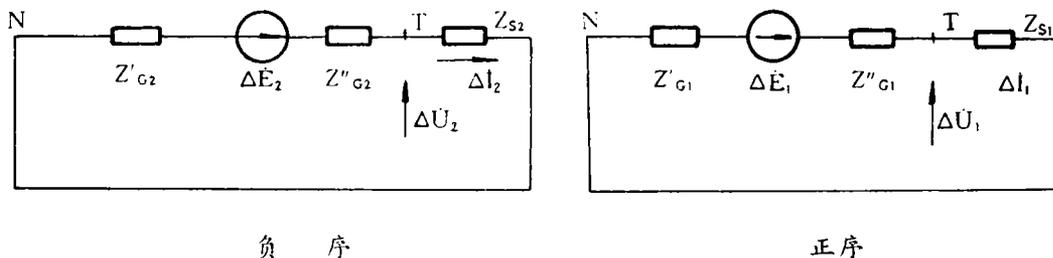


图1 发电机匝间故障序网图

收稿日期:1995-05-04

发生匝间短路时的正、负序网图见图 1:

图中,  $Z'_G, Z''_G$  为故障点两侧的发电机阻抗,  $Z_S$  为系统阻抗, N 为发电机中性点, T 为机端。

由序网图可见:

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta U_2}{Z_{S2}} = \frac{\Delta U_2}{z_{S2}} e^{-j\alpha_s}, \quad \Delta I_1 = \frac{\Delta U_1}{Z_{S1}} = \frac{\Delta U_1}{z_{S1}} e^{-j\alpha_s}$$

这里  $\alpha_s$  为系统阻抗角。

因故障前,  $\Delta U_2, \Delta I_2, \Delta U_1$  及  $\Delta I_1$  都很小, 应该为零, 但发生故障时,  $U_2, I_2, U_1$  及  $I_1$  都有突变, 按照图中的参考方向,  $\Delta U_2, \Delta I_2, \Delta U_1$  及  $\Delta I_1$  都变大, 即  $\Delta U_2, \Delta I_2, \Delta U_1$  及  $\Delta I_1$  都为正, 故当故障开始时, 相量见图 2:

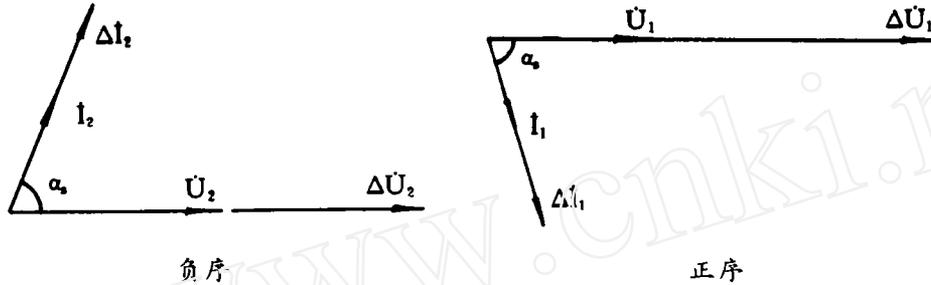


图 2 故障开始时正、负序相量图

故障切除时, 增量方向正好相反, 相量图见图 3:

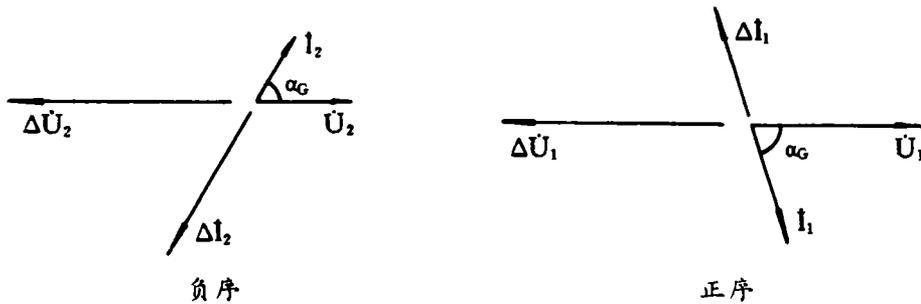


图 3 故障切除时的正、负序相量图

### 1.2 发电机内部发生相间故障

正、负序网图见图 4:

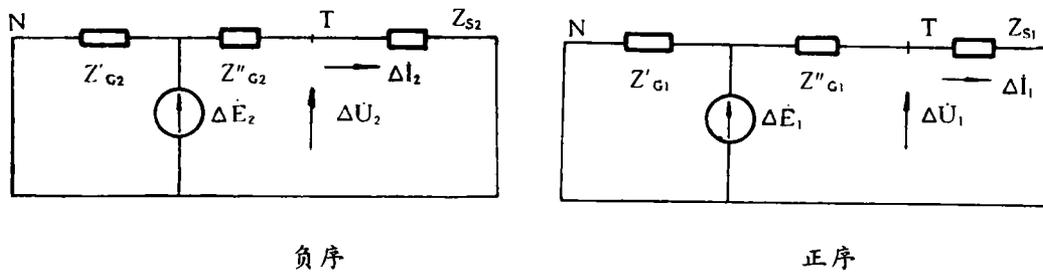


图 4 发电机内部相间故障, 正、负序网图

同匝间故障得:

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta U_2}{Z_{S2}} = \frac{\Delta U_2}{z_{S2}} e^{-j\alpha_s}, \Delta I_1 = \frac{\Delta U_1}{Z_{S1}} = \frac{\Delta U_1}{z_{S1}} e^{-j\alpha_s}$$

故障开始及故障切除时正负序相量图与匝间故障类似,省略。

### 1.3 发电机外部发生相间故障

正、负序网图见图 5:

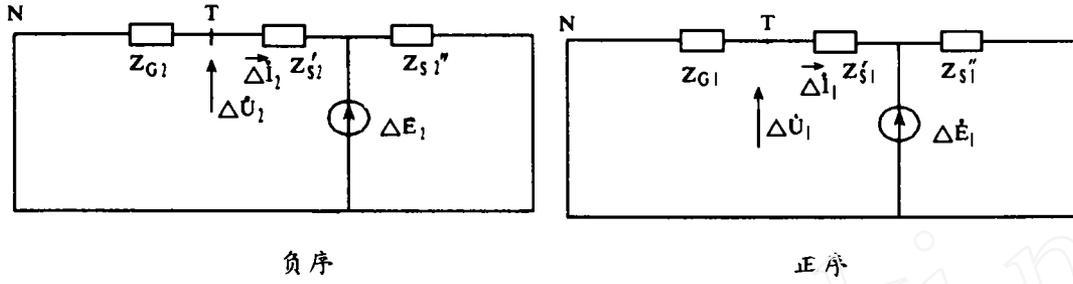


图 5 外部相间故障时的正、负序网图

由图可得:

$$\Delta I_2 = -\frac{\Delta U_2}{Z_{G2}} = -\frac{\Delta U_2}{z_{G2}} e^{-j\alpha_s}, \Delta I_1 = -\frac{\Delta U_1}{Z_{G1}} = -\frac{\Delta U_1}{z_{G1}} e^{-j\alpha_s}$$

故障开始时相量图见图 6:

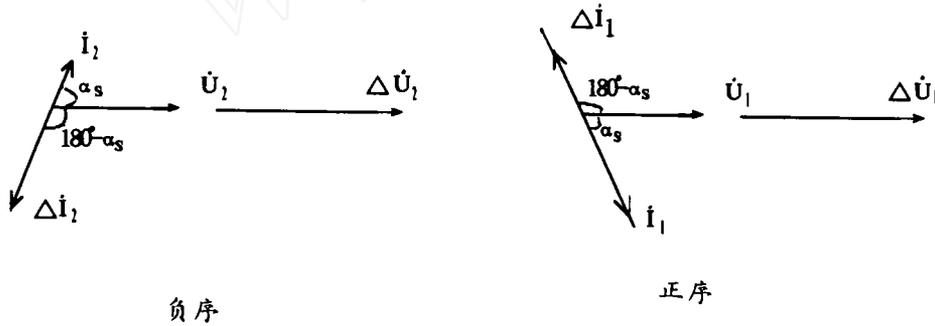


图 6 外部故障开始时正、负序相量图

故障切除时,增量方向与开始时相反,相量图见图 7:

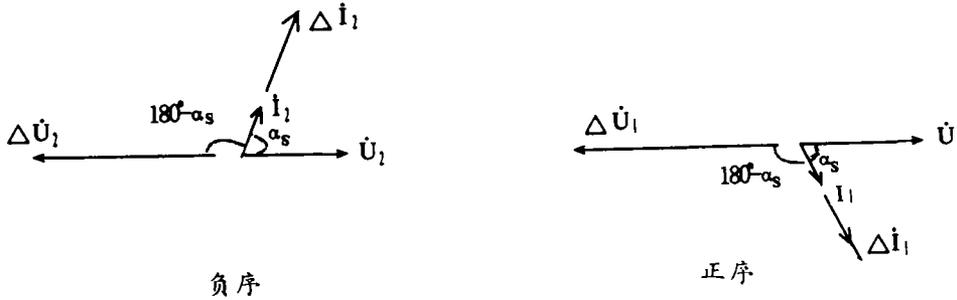


图 7 外部故障切除时正负序相量图

将以上三种情况下各量的大小变化情况及相位关系总结如下:

大小变化	$\Delta U_2$	$\Delta I_2$	$\Delta U_1$	$\Delta I_1$	$U_2$
内部故障开始	> 0	> 0	< 0	< 0	> 0
内部故障切除	< 0	< 0	> 0	> 0	> 0

外部故障开始	> 0	< 0	< 0	> 0	> 0
外部故障切除	< 0	> 0	> 0	< 0	> 0
相位关系					
内部故障开始	$\Delta U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$\Delta U_1$ 超前 $\Delta I_1$		
内部故障切除	$\Delta U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$U_2$ 滞后 $\Delta I_2$	$\Delta U_1$ 超前 $\Delta I_1$		
外部故障开始	$\Delta U_2$ 滞后 $\Delta I_2$	$U_2$ 滞后 $\Delta I_2$	$\Delta U_1$ 滞后 $\Delta I_1$		
外部故障切除	$\Delta U_2$ 滞后 $\Delta I_2$	$U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$\Delta U_1$ 滞后 $\Delta I_1$		

## 2 系统振荡情况分析

详细内容请参考<sup>[2]</sup>。这里直接给出振荡情况下的  $\Delta U_1$  及  $\Delta I_1$  的相量图见图 8:

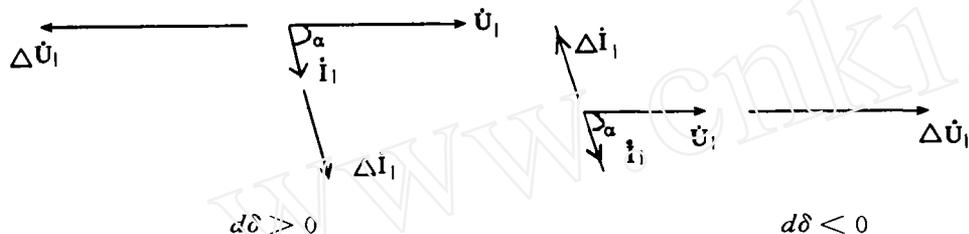


图 8 系统振荡时相量图

由相量图可见,  $\Delta I_1$  始终超前  $\Delta U_1$ 。

## 3 保护及闭锁方案的提出

归纳 1、2 两部分的分析, 当分别采用  $\Delta U_2$  超前  $\Delta I_2$ 、 $U_2$  超前  $\Delta I_2$  及  $\Delta U_1$  超前  $\Delta I_1$  的比相方法来构成的保护, 动作情况如下:

	$\Delta U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$U_2$ 超前 $\Delta I_2$	$\Delta U_1$ 超前 $\Delta I_1$
内部故障开始	动	动	动
内部故障切除	动	不	动
外部故障开始	不	不	不
外部故障切除	不	动	不
$d\delta > 0$ 振荡	×	×	不
$d\delta < 0$ 振荡	×	×	不

可见, 只要由  $\Delta U_2$  超前  $\Delta I_2$  和  $U_2$  超前  $\Delta I_2$  两判据相“与”构成的保护, 只有在内部故障开始时才动作, 其它故障工况下可靠不动作。但由于系统振荡时, 电流、电压变化很复杂, 此时由上述两判据构成的保护有可能误动, 故采用  $\Delta I_1$  超前  $\Delta U_1$  的方式来闭锁。但从  $I'_1 - \delta$  及  $U'_1 - \delta$  关系曲线可见(参考<sup>[2]</sup>), 当  $\delta_{\max}$  较大,  $\delta_{\min}$  较小, 即振荡比较严重时,  $\Delta I_1$ 、 $\Delta U_1$  比较小, 反应在比相上,  $\Delta I_1$  超前  $\Delta U_1$  的方案就不灵敏, 故而在这种严重振荡情况下, 有可能造成闭锁失效, 解决的办法就是使闭锁保持一段时间有效, 这段时间整定为振荡周期的一半就足够了, 整定时可视具体情况而定。

这种闭锁方案, 在外部故障或发生振荡时, 都起到可靠闭锁的作用, 从而防止了外部故障

引起的暂态效应对保护的影响,这样只要振荡存在,保护的闭锁判据就一直成立,也就是说,保护的闭锁时间是由振荡的持续时间决定的,一旦系统趋于稳定,闭锁也将自动解除。如果系统振荡时发生了内部故障或者外部故障发生后接着又发生了内部故障,保护也应做到可靠动作,这时就要用到闭锁解除判据; $\Delta U_1$ 超前 $\Delta I_1$ ,事实上,闭锁解除判据和闭锁判据是同一种实现方式,只是整定的方式和灵敏度不同。为方便起见,可以不考虑上述两种内部故障发生的可能性。

#### 4 方案的算法及实现方式

为方便起见,这里把<sup>[1]</sup>中的一个判据重复如下:

设  $X, Y$  为两相量,若  $x(t)y(t - \Delta t) - x(t - \Delta t)y(t) > 0$ , 则  $Y$  超前于  $X$ , 否则  $X$  超前于  $Y$ 。若

$$x(t) = A\sin\omega t, y(t) = B\sin(\omega t + \alpha), \omega\Delta t = 30^\circ, \text{ 则: } x(t)y(t - \Delta t) - y(t)x(t - \Delta t) = 1/2AB\sin\alpha \quad (1)$$

故在  $0 \sim 180^\circ$  范围内,当 1 式大于 0 时,  $0 < \alpha < 180^\circ$ , 即  $Y$  超前于  $X$ 。很显然,当  $\alpha = 90^\circ$  时, 1 式有最大值,即由此判据构成的保护有最大灵敏度。

对于本保护方案,写成离散形式,设

$$\Delta U_2(k-1)\Delta I_2(k) - \Delta U_2(k)\Delta I_2(k-1) > k_1(\Delta U_2, \Delta I_2) \quad (2)$$

$$\Delta U_2(k-1)\Delta I_2(k) - U_2(k)\Delta I_2(k-1) > k_2(U_2, \Delta I_2) \quad (3)$$

$$\Delta U_1(k)\Delta I_1(k-1) - \Delta U_1(k-1)\Delta I_1(k) > k_3(\Delta U_1, \Delta I_1) \quad (4)$$

$$\Delta U_1(k-1)\Delta I_1(k) - \Delta U_1(k)\Delta I_1(k-1) > k_4(\Delta U_1, \Delta I_1) \quad (5)$$

这里  $k_1 \sim k_4$  分别是相关量的函数,是为提高保护的灵敏度及可靠性而采取的一种自适应保护措施。

当 2、3 式同时成立,4 式不成立时,保护动作。

4 式成立时,保护闭锁。

2、3、4、5 式同时成立时,闭锁解除,保护动作。

对于一般系统来讲,阻抗角为  $70 \sim 80^\circ$ ,对于本保护,为获得最大灵敏度,可分别把  $\Delta U_2$  及  $\Delta U_1$  向前移相  $10 \sim 20^\circ$ ,这里取  $15^\circ$ ,即视阻抗角为  $75^\circ$ 。

据文献<sup>[1]</sup>,把  $x(k)$  移相任意角度  $\theta$  得到一新相量  $x'(k)$  的两点算法为:

$$x'(k) = (1/\sin\omega\Delta t)[\sin(\omega\Delta t + \theta)x(k) - \sin\theta \cdot x(k-1)] \quad (6)$$

$\theta$  为正时,  $x'(k)$  超前  $x(k)$ ,  $\omega\Delta t$  为采样间隔角,当每周采样十二点时,为  $30^\circ$ ,故当  $\theta = 15^\circ$  时,

$$x'(k) = 1.414x(k) - 0.5176x(k-1) \quad (7) \quad (\text{下转 51 页})$$

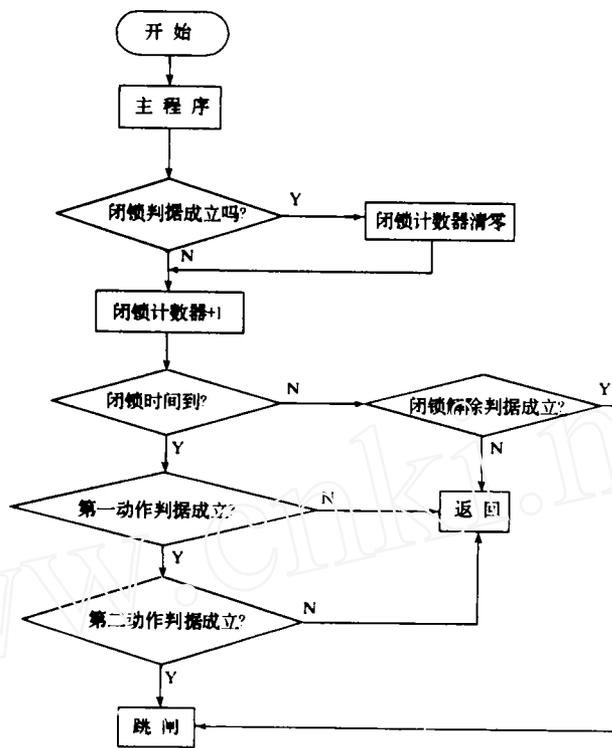


图 9 程序简单框图

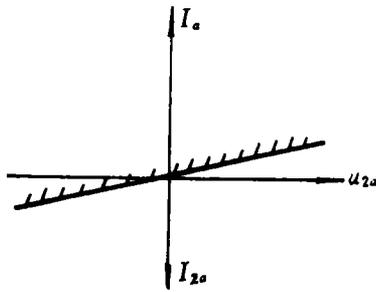


图 7

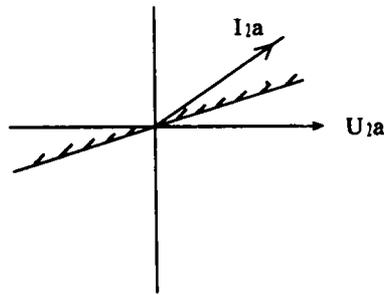


图 8

③ 通入 C、A 相电流断开 B 相并短接回零。此时

$$I_{2a} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

$$= \frac{1}{3} (I_a + a I_c) = -\frac{1}{3} I_c$$

同样将  $I_{2a}$  划入继电器动作区图上, 同样图 2 套在图 8 上, 进行分析继电器在各种负荷情况下的动作状态。分析结果也填表 2 内。

电压回路模拟 B、C 相短路和模拟 CA 相短路, 轮流断开一相电流, 在各种负荷状态下的继电器的动作行为的分析方法和前面模拟电压 A、B 相短路一样, 本文不再分析, 只把分析结果填入表 2 中, 表 2 中填入的结果, 是在模拟 BC 短路时, 是将继电器 B、C 两端子短接后接入 B 相电压, 模拟 CA 短路时接入 C 相电压时的分析结果。

3 以上对模拟单相接地短路和两相短路都进行了分析, 目的是多提供一些方法给现场试验的同志容易根据现场条件(如端子排的布置等情况)加以选用。并不是要求三相都要进行模拟试验。本人认为模拟单相接地短路比较简单, 如只做模拟电压 A 相接地短路(或模拟 B 相或 C 相)轮流通入三相电流后即可得到满意的结果, 只通入一相电流不行, 易造成错误判断。

(上接 30 页) 为计算方便, 可分别把  $\Delta I_2$  及  $\Delta I_1$  向后移相  $15^\circ$ , 即取  $\theta = -15^\circ$ , 此时,

$$x'(k) = 0.5176[x(k) + x(k-1)] \quad (8)$$

当本保护用于发电机时, 用到的量为机端三相电压和机端三相电流, 而用于保护整个发变组时, 用到的量则为主变高压侧的三相电压和三相电流。本保护方案用微机具体实现时, 当采样数据续入后, 首先进行数字滤波和数字滤序等数据处理, 得出纯净的正、负序电压和电流分量  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$  和  $I_2$ , 并求出它们的增量  $\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$ 、 $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$ , 再把  $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$  向后移相  $15^\circ$ , 就可利用上述判据进行比相判断了。

## 5 结论

本保护方案可用于反应包括发电机匝间故障在内的发电机或发变组内部各种不对称故障, 而在各种振荡情况及外部故障时, 保护又可靠闭锁。由于本保护方案新颖、闭锁方法独特, 与其它形式的匝间保护相比有很大的优越性。

### 参考文献

- 1 宋聚忠 600MW 大型机组微机成套保护装置的研制(部分工作), 合肥工业大学硕士研究生毕业论文, 1991. 4
- 2 宋聚忠、林韩、姚晴林等. 一种新型的微机发电机失步预测及失步保护方案. 继电器. 1995. 2