

# 汽轮发电机三相短路引起的失步仿真及保护

董恩钊<sup>1</sup>,王祥珩<sup>1</sup>,王维俭<sup>1</sup>,李瑞生<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机系,北京 100084; 2. 许继集团,河南 许昌 461000)

**摘要:** 建立了包括汽轮机、发电机、调速器和励磁调节装置在内的全系统仿真模型,编制了仿真软件,在模拟发电机组上进行了三相突然短路故障引起的失步实验和仿真分析,实验结果验证了仿真结果的正确性。对某电厂 300 MW 汽轮发电机进行了三相短路故障引起失步的仿真研究,并对三阻抗元件失步保护和改进型三阻抗元件失步保护进行了整定计算及分析。

**关键词:** 暂态稳定; 振荡中心; 整定计算; 失步保护

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)09-0020-06

## 1 引言

电力系统稳定性问题是指电力系统运行中受到扰动之后能否继续保持发电机间同步运行的问题。根据扰动大小所确定的稳定问题的性质,把它分为静态稳定和暂态稳定。所谓电力系统静态稳定性,一般是指电力系统在运行中受到微小扰动后,独立地恢复到它原来的运行状态的能力。电力系统具有暂态稳定性,一般是指电力系统在正常运行时,受到一个大的扰动后,能从原来的运行状态,过渡到新的运行状态,并在新的运行状态下稳定地运行,而暂态不稳定的后果则是系统失去同步。

引起电力系统大扰动的原因主要有以下几种:

- (1) 负荷的突然变化,如投入或切除大容量的用户等;
- (2) 切除或投入系统的主要元件,如发电机、变压器及线路等;
- (3) 发生短路故障。

其中短路故障的扰动最为严重,常以此作为检验系统是否具有暂态稳定的依据。

本文针对三相突然短路故障引起的失步过程,利用 C++ 语言编写了仿真程序,对具有调速器和励磁环节的汽轮发电机发生三相突然短路故障后失步的动态过程进行仿真,并通过自编的主设备整定计算软件进行整定,利用仿真和整定结果对三阻抗元件失步保护和改进型三阻抗元件失步保护进行分析。

## 2 数学模型

仿真中,发电机组采用的数学模型为单机对无穷大系统,如图 1 所示。

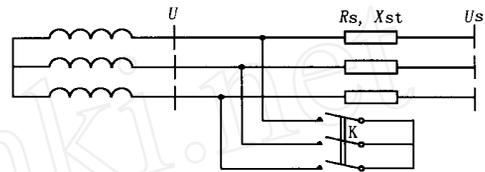


图 1 单机对无穷大系统示意图

Fig. 1 A generator connected to an infinite bus

正常运行时,开关 K 断开;当 K 闭合时,发生发电机机端三相突然短路故障;当开关 K 再次断开时,故障切除。

### 2.1 发电机的数学模型

采用 PARK 方程<sup>[1]</sup>对发电机进行数学建模。建模过程中,除考虑发电机机端电压和机端电流的变化以及转子励磁电流和励磁电压的变化外,还考虑了发电机的功角和转差 s 的变化情况。其矩阵形式如下:

$$[U] = [X] \frac{d}{dt} [I] + ([R] + \omega_r [G]) [I] \quad (1)$$

式中:  $[U] = [u_d, u_q, u_{fd}, 0, 0]^T$ ;  $[I] = [i_d, i_q, i_{fd}, i_{1d}, i_{1q}]^T$ ; X、R、G 分别为电抗、电阻和电导矩阵,  $\omega_r$  为转子角速度。

转子运动方程和功角的变化方程为

$$H \frac{d\delta}{dt} = T_1 - T_{em} \quad (2)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega \quad (3)$$

式中 H 为转动惯量,  $T_1$  为发电机原动机的输入转矩,电磁转矩  $T_{em} = i_q \cdot \omega_d - i_d \cdot \omega_q = [I]^T [G] [I]$ ,  $\omega$  为发电机的同步角速度。

### 2.2 输电系统的数学模型

输电系统在 abc 坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{as} & x_{abs} & x_{acs} \\ x_{abs} & x_{bs} & x_{bcs} \\ x_{acs} & x_{bcs} & x_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

假定输电线为换线线路,  $r_{as} = r_{bs} = r_{cs}$  为 a, b, c 相电阻;  $x_{as} = x_{bs} = x_{cs}$  为 a, b, c 相的自电抗;  $x_{abs} = x_{bcs} = x_{acs}$  为 abc 相间互电抗。运用 PARK 坐标变换将其变换到 dq 坐标系后, 方程可以写为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -x_s & 0 \\ x_s & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_{s0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $r_s$  为线路的正序电阻;  $x_s$  是线路的正序电抗;  $r_{s0}$ 、 $x_{s0}$  是线路的零序电阻、电抗。

### 2.3 调速系统的数学模型

为了控制原动机向发电机输出的机械功率, 以及在并列运行的发电机之间合理地分配负荷, 每一台原动机都配置了调速器。原动机和调速器的组合构成了发电机的调速系统。

国内外的大型汽轮机组, 大都采用中间再热式汽轮机, 由于一阶模型没有计及中间再热蒸汽容积效应, 过于粗糙; 三阶模型又有些繁琐, 在本文的精度要求下, 对汽轮机的仿真采用二阶模型, 其传递函数框图如图 2 所示。

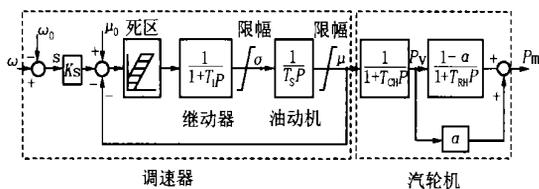


图 2 汽轮机调速系统数学模型

Fig. 2 The mathematical model of speed governor system

在动态模拟实验室进行三相短路故障引起的失步实验时, 模拟发电机组采用的原动机是直流电动机, 因此在对模拟发电机组的三相突然短路及故障切除进行仿真计算时, 采用了如图 3 所示的直流电动机数学模型。

### 2.4 励磁调节系统的数学模型

励磁系统是发电机的重要组成部分, 对电力系统及发电机本身的安全有很大的影响。现代的大容

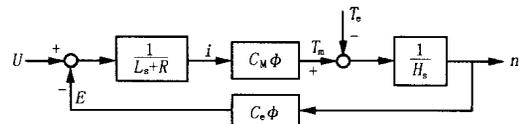


图 3 直流电动机模型

Fig. 3 The mathematical model of DC motor

量汽轮发电机广泛采用半导体励磁系统, 常用的有它励静止硅整流器励磁系统、它励旋转半导体励磁系统(即无刷励磁)、自并励半导体励磁系统及自复励半导体励磁系统等。

本文根据励磁调节系统的原理及动作特性, 使用了一种简化的具有可控硅励磁调节器的交流励磁系统的数学模型, 如图 4 所示。

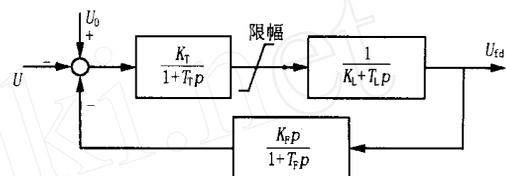


图 4 励磁系统数学模型

Fig. 4 The mathematical model of excitation system

## 3 仿真和实验结果对比

本文对模拟发电机组发生三相短路故障引起的失步过程进行仿真, 并同实验结果进行了对比。

进行实验的模拟发电机组是隐极机, 其额定参数:  $S_N = 30 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,  $U_N = 400 \text{ V}$ ,  $I_N = 43.3 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi_N = 0.8$ 。实验记录了发电机机端三相短路引起的失步, 振荡中心<sup>[21]</sup>分别在发变组内和发变组外的实验结果。下面列出振荡中心在发变组内和振荡中心在发变组外两种情况下的仿真结果和实验波形。图 5 中, 线路阻抗为  $r_s = 0.03661$ ,  $x_s = 0.41844$ , 故障前运行状况为  $U = 0.89$ ,  $I = 0.67$ ,  $\cos \varphi = 0.99$  (滞后) (本文采用常用的可逆互感系数的标幺值系统), 发生三相短路故障后, 经 0.225 s 切除故障的实验波形

形和仿真波形; 图 6 中, 线路阻抗为  $r_s = 0.08$ ,  $x_s = 1.52844$ , 故障前运行状况为  $U = 1.03$ ,  $I = 0.45$ ,  $\cos \varphi = 0.90$  (滞后), 发生三相短路故障后, 经 0.24 s 切除故障的实验波形和仿真波形。

通过对实验波形和仿真波形的比较, 可以看出所采用的数学模型是正确的, 数值算法也能满足计算的精度要求。振荡中心是系统振荡时电气量变化最剧烈的一块区域(或一点), 它的特点是电压跌落

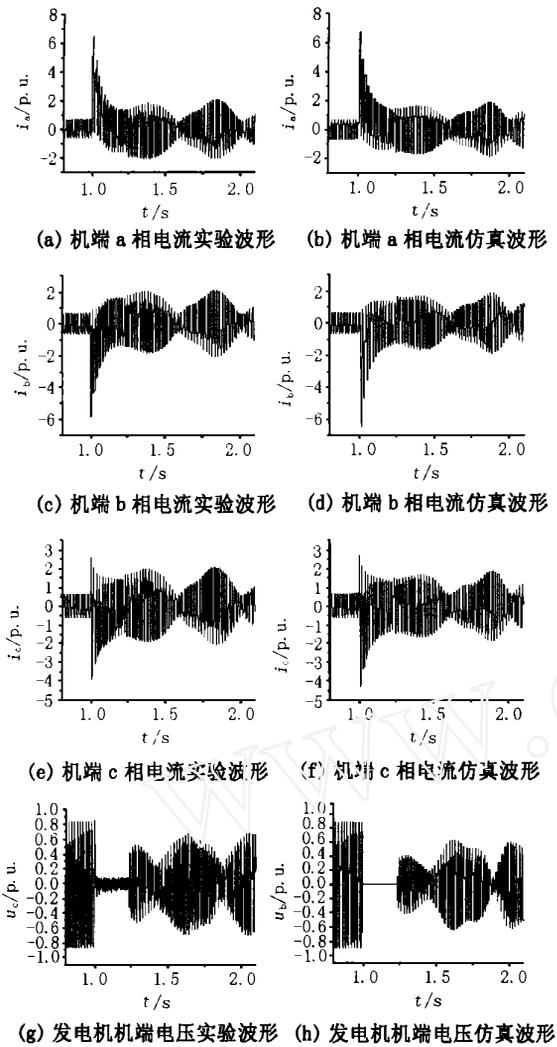


图5 振荡中心在发变组内时的失步波形

Fig. 5 Out-of-step waveforms with oscillation center inside of generator-transformer

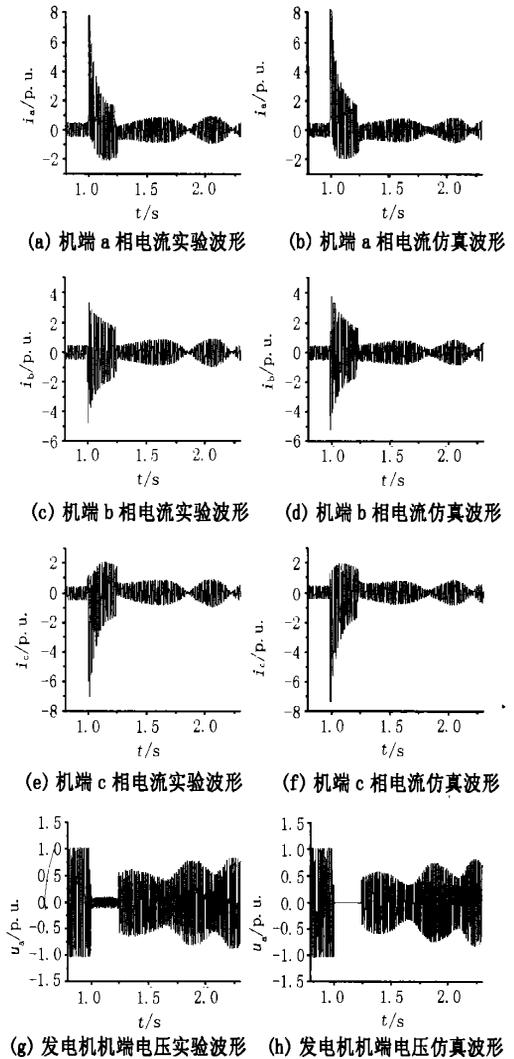


图6 振荡中心在发变组外的失步波形

Fig. 6 Out-of-step waveforms with oscillation center outside of generator-transformer

最为严重,实验与仿真结果表明线路阻抗的大小与振荡中心的位置密切相关。

#### 4 某电厂 300 MW 汽轮发电机仿真计算

本节对实际电厂 300 MW 汽轮发电机组进行仿真,其额定参数为:

$$P_N = 300 \text{ MW}, U_N = 20 \text{ kV}, I_N = 10.189 \text{ kA}, \cos N = 0.85 (\text{滞后}), n_N = 3000 \text{ r/min}.$$

发电机正常运行时的工况为:  $U = 1.05, I = 1.0, \cos = 0.9$  (滞后)。仿真中均令  $t = 0.5 \text{ s}$  时发生机端三相突然短路故障,分别取如下情况对其进行仿真:

- (1) 励磁调节器不动作,经 0.3 s 切除故障;
- (2) 励磁调节器不动作,经 0.38 s 切除故障;

- (3) 励磁调节器动作,经 0.38 s 切除故障;
  - (4) 励磁调节器动作,经 0.415 s 切除故障;
- 通过仿真可以发现:情况(1)、(3)经过几次振荡后,振幅逐渐衰减,最后保持稳定;情况(2)、(4)中,发电机振荡愈来愈强烈,最终导致失步。下面列出情况(2)和(3)的仿真结果(见图7,图8)。

对比以上四种情况的仿真结果,可以看出在相同的短路持续时间 0.38 s 情况下,由于励磁调节器的自动调节作用,输出的励磁电源电压随着机端电压的大小变化进行调整,较好地维持发电机的机端电压,使得发电机最终没有失步,而没有励磁调节器的发电机在相同的故障条件下最终失步。可见自动励磁调节器对提高系统的暂态稳定性有一定的作

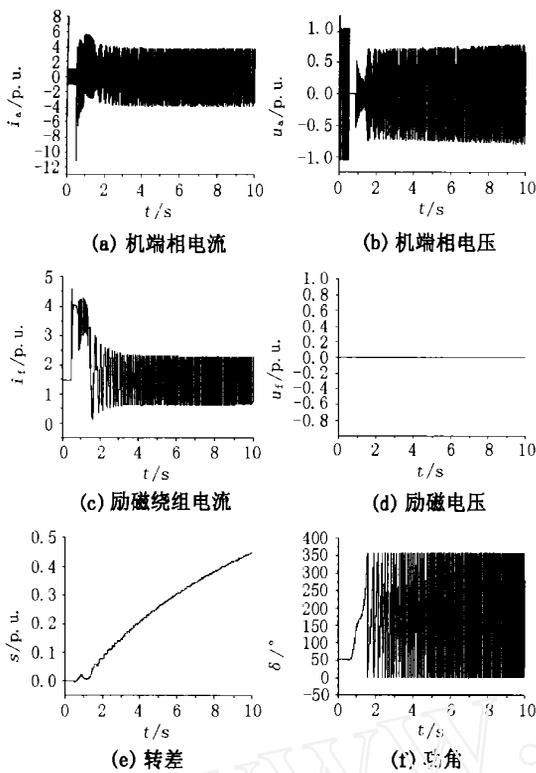


图7 情况(2)下的仿真波形

Fig. 7 The simulation waveforms under 2<sup>nd</sup> situation

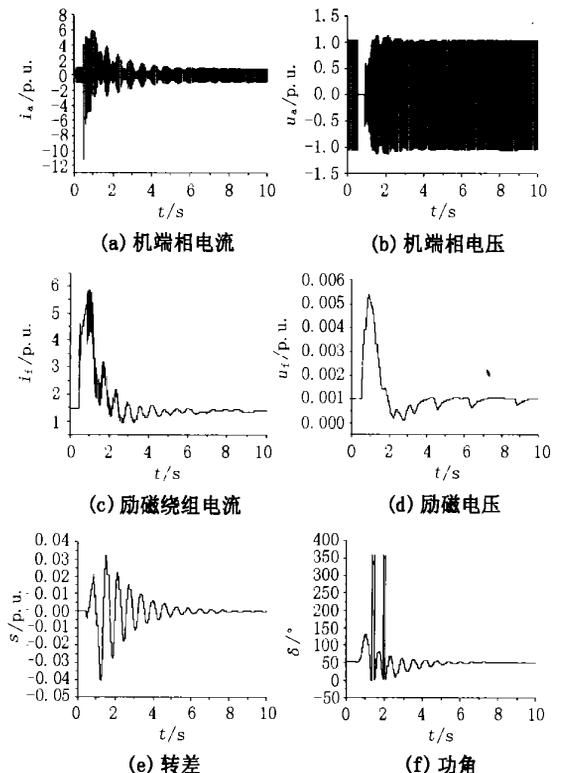


图8 情况(3)下的仿真波形

Fig. 8 The simulation waveforms under 3<sup>rd</sup> situation

用。但是如果短路持续时间过长,发电机将会与系统失去同步。经过仿真计算,在有、无励磁调节器的两种情况下,此单机对无穷大系统在故障下的极限切除时间分别为 0.413 4 s 和 0.375 8 s。

### 5 三阻抗元件失步保护

尽管目前的失步保护有很多种,但是发电机的功角变化状况和发电机本身能量的平衡能力是衡量发电机运行状况与稳定性的根本,发电机的失步保护与预测方案也都是围绕这两点进一步发展和演变的,下面用仿真的结果来分析三阻抗元件失步保护。

#### 5.1 三阻抗元件失步保护的原理

如图 9 所示单机—无穷大系统发生振荡时,假设各阻抗的阻抗角相等,则发电机与系统之间的功角  $\delta$  是由机端测量阻抗  $Z_j$  和发电机暂态阻抗  $Z_d$  以及发电机与系统的联系电抗  $Z_{st}$  所组成的封闭阻抗三角形来决定。各阻抗分别乘以电流,可得各电压向量,如图 10 所示,其中  $E_g$  与  $E_s$  向量之间的相角差就是功角,即  $\delta = \arg\left(\frac{E_g}{E_s}\right) = \arg\left(\frac{U_g + IZ_d}{U_g - IZ_{st}}\right)$ ,

滑差频率  $f_s = \frac{1}{2} \frac{d}{dt}$ , 振荡中心的位置由阻抗轨迹和

透镜主轴的交点获得。

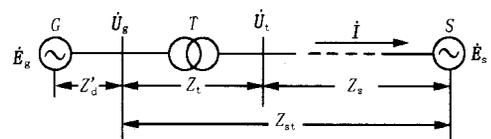


图9 单机与无穷大系统失步示意图

Fig. 9 Out-of-step with a generator connected to an infinite bus

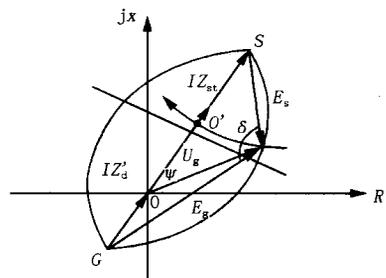


图10 发电机与系统振荡时阻抗相量图

Fig. 10 Impedance phasor diagram of oscillation between generator and system

#### 5.2 三阻抗元件失步保护的整定计算

通过自编的发变组保护整定计算软件对失步保护进行整定,首先用一次侧公用参数将发电机、变压

器、线路、系统电抗等都折合到机端电压级的标么值,计算过程如下:

$$x_t = U_k \% \times S_{gn} / S_{tn}, x_s = x_{s0} * U_{gn}^2 / (S_j * Z_N),$$

$$x_l = x_l * l * U_{gn}^2 / (U_L^2 * Z_N), Z_n = U_{gn}^2 / S_{gn},$$

其中  $x_t$ 、 $x_l$ 、 $x_s$  分别为变压器电抗、线路电抗和系统等值电抗,均为标么值,  $Z_n$  为阻抗基值,  $l$  为线路长度,单位 km,  $x_l$  为导线单位长度的电抗。

透镜在  $R-X$  平面上第 象限的最远点的阻抗  $Z_A$  按机端至无限大系统之间的联系阻抗  $Z_{st}$  进行整定:

$$Z_A = (x_t + x_s + x_l) Z_N = 0.2 \times 1.133 = 0.227$$

。透镜在  $R-X$  平面第 象限的最远点的阻抗  $Z_B$ , 按同步电机的纵轴暂态电抗  $x'_d$  进行整定:

$$Z_B = x'_d Z_N = 0.213 \times 1.133 = 0.242,$$

按照滑极继电器 段和 段跳闸区的要求,电抗  $Z_C$  的整定一般可选变压器电抗的 90%:

$$Z_C = 0.9 x_t Z_N = 0.9 \times 0.15 \times 1.133 = 0.153,$$

因为  $n_a = 16000 \text{ A} / 1 \text{ A}$ ,  $n_v = 20000 \text{ V} / 100 \text{ V}$ ,二次侧整定值确定如下:

$$Z_{A(二次)} = Z_A \times n_a / n_v = 18.128,$$

$$Z_{B(二次)} = Z_B \times n_a / n_v = 19.288,$$

$$Z_{C(二次)} = Z_C \times n_a / n_v = 12.236;$$

表 1 不同方法计算功角到达某些特定值的时刻

Tab.1 The time when power-angle being some specific numbered in different calculation method

时刻	仿真 1		仿真 2		仿真 3		仿真 4	
	间接法	直接法	间接法	直接法	间接法	直接法	间接法	直接法
$t_{125^\circ}$	—	—	0.940 3	0.918 0	—	—	0.933 2	0.924 7
$t_{180^\circ}$	—	—	1.301 3	1.230 3	—	—	1.309 8	1.264 2
$t_{235^\circ}$	—	—	1.430 8	1.424 6	—	—	1.439 3	1.446 2
$t$	—	—	0.490 5	0.506 6	—	—	0.506 1	0.521 5

注: —表示该情况没有发生,下表与此相同,不再指出

### 5.4 改进型三阻抗元件失步保护

三阻抗元件失步保护尽管有鉴别短路与振荡、失步振荡与同步摇摆的能力,但是它不具备预测功能,保护动作的结果只能是切机或解列,没有时间采取相应的抑制失步措施保持系统稳定。鉴于此,文献[3]提出在此三阻抗元件失步保护的基础上加以改进,计算发电机与系统之间的功角的方法与三阻抗元件失步保护中的方法相同,由机端测量阻抗间接算出,然后通过某种算法来预测功角的变化轨迹。

本文采用多项式回归模型对功角进行预测:

$(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \dots + a_m t^m$ ,其中  $(t)$  为将来某时刻功角  $(t)$  的预测值,  $a_0, a_1 \dots a_m$  根据历

透镜主轴(阻抗器直线)的倾斜角  $Z$  一般选取  $Z_{st}$  与  $x_d$  阻抗角的平均值,近似取  $Z = 85^\circ$ 。

的整定:

为保证机组最大负荷时的最小阻抗  $r_{L, \min}$  位于透镜之外,以保证保护的動作选择性,为此选择

$$\min = 180^\circ - 2 \arctg \left[ 1.54 \frac{r_{L, \min}}{|Z_A + Z_B|} \right] = 33.8^\circ,$$

一般要求检测的最大滑差频率  $f_{s, \max}$  为 5 Hz,所以  $\max = 180^\circ \times (1 - 0.05 f_{s, \max}) = 135^\circ$ ;通过仿真计算,为保证故障切除后机端阻抗点位于透镜圆外,取  $\text{set} = 125^\circ$ ,此时  $f_{s, \max} = 20 \times (1 - / 180^\circ) = 6.1 \text{ Hz}$ 。

### 5.3 三阻抗元件失步保护的应用

下面应用 5.2 节整定的三阻抗元件失步保护,分别对第 4 节四种情况的仿真进行讨论。阻抗轨迹与透镜主轴的夹角(即功角)为  $125^\circ, 180^\circ, 235^\circ$  的时刻分别记为  $t_{125^\circ}, t_{180^\circ}, t_{235^\circ}$ ,  $t = t_{235^\circ} - t_{125^\circ}$ 。仿真中功角直接通过  $(t) = \theta_0 + \omega t$  来计算(在实际中可以在发电机转子上安装测速装置来实现),与前面用阻抗轨迹间接计算功角的结果比较见表 1。

对于(1)、(3)没有失步的情况,三阻抗元件失步保护没有动作;对于(2)、(4)失步的情况,由于阻抗轨迹穿过透镜,而且穿越的时间大于 50 ms,所以三阻抗元件失步保护可靠动作。

史数据  $(t) \dots (N \cdot t)$ ,用最小二乘法按  $A_m = B(N) \cdot (N)$  预测,其中

$$A_m = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m]^T,$$

$$(N) = [ (0) \ (t) \ \dots \ (N \cdot t) ]^T,$$

$$B(N) = [ H^T(N) \cdot H(N) ]^{-1} \cdot H^T(N)$$

$$H(N) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & t & (t)^2 & \dots & (t)^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & N \cdot t & (N \cdot t)^2 & \dots & (N \cdot t)^m \end{bmatrix}_{(N+1) \times (m+1)}$$

$H(N)$  矩阵是一个常数阵,所以  $B(N)$  可事先离线计

算出来。这样多项式方程就转化为差分方程的形式,再根据预测时刻  $k t$ , 计算出预测功角值  $(k t)$ 。

应用 5.2 节整定的  $Z_A$ 、 $Z_B$  值,对上述四种情况的仿真进行失步预测分析。取预测时间为 300 ms,每隔 10 ms 观察的 12 个数据组成历史数据窗口,连续 3 次预测出失步后(功角大于  $180^\circ$ )发出告警信号,设其时刻为  $t_1$ ,到达功角  $180^\circ$  的时刻为  $t_0$ ,提前预测量为  $t$ 。预测过程中为提高预测计算精度,采用滚动预测,不断采用新数据,用最新的采样值更新预测数据

窗的数据。表 2 分别列举了间接和直接两种方法计算功角时的失步预测结果。

对于仿真(1)、(3)不失步的情况,功角预测值始终小于  $180^\circ$ ,不满足动作判据,保护正确不动;对于仿真(2)、(4)失步的情况,均提前预测出功角大于  $180^\circ$ ,满足动作判据,保护正确动作。可见改进的三阻抗元件失步保护能提前预测出发电机的失步情况,其时间提前量为抑制失步、保持发电机稳定提供可能。

表 2 不同方法计算功角时的失步预测结果

Tab. 2 Out-of-step prediction results in different method to calculate power-angle

时刻	仿真 1		仿真 2		仿真 3		仿真 4	
	间接法	直接法	间接法	直接法	间接法	直接法	间接法	直接法
$t_0$	—	—	1.301 3	1.230 3	—	—	1.309 8	1.264 2
$t_1$	—	—	1.087 8	1.048 8	—	—	1.090 4	1.079 6
$t$	—	—	0.213 5	0.181 5	—	—	0.219 4	0.184 6

由于  $Z_{st}$  和  $x_d$  在失步过程中不是固定不变的,因此通过阻抗轨迹间接计算功角并不精确,理论上基于初相角和转差计算功角的方法更准确。比较表 1 和表 2 可知,两种方法计算出来的结果相差不大。

## 6 结论

为研究发电机三相短路引起失步的动态过程及其保护,本文建立了包括励磁调节器、调速器、汽轮机和发电机在内的发电机系统模型,实验和仿真结果表明数学模型和计算方法是正确的。对某电厂的 300 MW 汽轮发电机组分不同情况进行仿真计算,说明了励磁调节器对提高系统暂态稳定性的作用,并利用仿真结果对三阻抗元件失步保护和改进型三阻抗元件失步保护进行整定计算和分析,验证了改进型三阻抗元件失步保护有较好的预测功能。

## 参考文献:

- [1] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 毕大强,张项安,王祥珩. 同步发电机三阻抗元件失步保护原理的改进[J]. 清华大学学报,2002,42(9): 1144-1147.

收稿日期: 2003-06-02

作者简介:

董恩钊(1977-),男,硕士研究生,从事主设备保护整定计算的工作;

王祥珩(1940-),男,教授,博士生导师,长期从事电机分析和控制、电机故障及保护工作;

王维俭(1930-),男,教授,长期从事电气主设备继电保护的教学和科研工作。

## Out-of-step simulation and protection for turbine-generator caused by three phase short-circuit

DONG En-zhao<sup>1</sup>, WANG Xiang-heng<sup>1</sup>, WANG Wei-jian<sup>1</sup>, LI Rui-sheng<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In order to analyze the out-of-step dynamic process of turbine-generator caused by three phase short-circuit, and to verify the out-of-step protection scheme, math models of a generation system are built and the simulative software is programmed, which includes steam turbine, generator, speed governor and field regulator. The out-of-step test and simulative analysis are carried out on a simulative generation system in a laboratory and the experimental results verify the correctness of simulation results. The simulative analysis of out-of-step process is done for a 300MW turbo generation system. The simulation results are valuable for setting calculation and analysis for the out-of-step protection based on the three-impedance element principle and the improved principle.

**Key words:** transient stability; oscillation center; setting calculation; out-of-step protection