

# 基于功角直接测量及预测的发电机失步预测保护

严伟, 陆于平, 李鹏

(东南大学电气工程系, 江苏南京 210096)

**摘要:** 针对发电机失步预测保护所存在的问题, 介绍了一种基于功角直接测量的自回归预测失步的方法, 并在此基础上提出了一套完整的保护方案。通过对算法的精度和误差进行了数字仿真分析, 表明这种方案的精度较高。基于此方法实现的大型发电机失步及失步预测保护与传统的保护相比, 物理概念明确, 对失步的预测及判别更加完善。目前, 基于此方法的新型微机发电机失步及失步预测保护已在研制之中。

**关键词:** 振荡; 功角; 失步预测; 自回归模型; 保护方案

**中图分类号:** TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)03-0020-03

## 1 引言

发电机组是电力系统重要的组成部分之一。随着大机组和超高压电力系统的发展, 发电机组的台数不断增多, 其单机容量也迅速增大, 且大型发电机组均与变压器组成单元接线, 一旦发生系统振荡, 振荡中心常位于发电机端附近, 会危及发电机及变压器甚至整个系统的安全; 而且, 振荡电流的持续出现, 将使大型汽轮发电机定子过热、端部遭受机械损伤, 使大轴扭伤, 缩短运行寿命。所以从电力系统安全稳定的客观要求出发, 发电机失步及失步预测保护十分必要。

目前, 常用的或已开发的失步预测保护有以下几种:

(1) 基于间接反映功角的失步预测保护。此类保护如反映阻抗变化率预测失步等, 通过发电机定子侧电气量间接反映功角, 普遍反映不精确, 易受系统运行方式变化的影响。

(2) 基于暂态稳定计算的失步预测保护。此类失步保护以稳定判据和理论为依据。常见的有: 采用李雅普诺夫直接法的失步预测的失步保护; 基于能量原理的等面积失步预测保护等。在实际应用中, 存在一定的局限性, 如等面积法则就不适合静稳被破坏的情况。

(3) 基于同步相位测量的失步保护。此类失步保护的特点是将远地某一参考电压的信号通过通道同步传入本地并与本地电压信号进行比相来判别和预测失步。GPS较好地解决了电力系统中不同地点向量测量的采样同步问题。但其测量装置(PMU), 造价比较昂贵。

本文针对上述问题, 提出了一种基于功角直接测量和时间序列多点自回归预测失步的方法和保护

方案。根据实时直接测量的功角, 利用现在和过去的的数据, 预测功角的变化趋势, 在扰动后短时间内完成失步预测功能, 并且能够跟踪振荡发展过程, 及时发出信号, 使保护采取相应的措施。

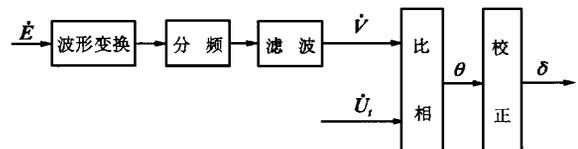


图1 测量功角的原理框图

## 2 保护原理和方案

### 2.1 功角直接测量原理

功角是电力系统的重要参数之一, 也是判别系统稳定以及发电机是否同步运行的依据。传统的功角测量是通过解析法进行的, 这种方法在系统稳态运行的情况下, 能比较准确地测量功角, 但在系统发生振荡等暂态情况下, 由于过于依赖定子侧的电气量, 此法的测量误差较大。若要直接测量功角, 首先要测出  $\dot{E}_q$  的位置, 但在通常情况下  $\dot{E}_q$  是无法测量的。通过同步发电机的转速测量装置的位置传感器输出的频率与转速成正比的电势进行分频等处理, 得到频率与  $\dot{E}_q$  保持同步的正弦波  $\dot{V}$ , 通过预校正的方法使  $\dot{V}$  与  $\dot{U}$  的夹角为功角<sup>[3]</sup>。但无穷大母线电压  $\dot{U}$  电压是无法取得的, 考虑到失步保护的需要在实际应用中, 用升压变压器高压侧母线电压  $\dot{U}_T$  与  $\dot{V}$  比相的方法来判别发电机是否失步。记  $\dot{U}_T$  与  $\dot{V}$  的夹角为  $\theta$ , 在构成保护判据时需将稳定极限折算为  $\theta_{db}$ 。上述测量功角的方法可用图1所示的原理框图来表示。  $\dot{E}$  为从发电机测速装置引出的信号。信号的波形变换, 分频, 滤波可用硬件来实现。而比相和角度的校正则通过软件来完成。实验

表明,功角直接测量的误差小于 3 度。

### 2.2 自回归预测模型及算法

预测的实质是通过若干个实测数据来构造出符合实际发展规律的模型,用这个模型预测将来的变化,并不断地用新的实测数据来修正模型,以保证其具鲁棒性及精度。根据电力系统的特点,通过比较分析,得到一种较优的时间序列多点自回归(AR)预测算法<sup>[4]</sup>,此算法简单,精度高,预测时间长和鲁棒性好。

AR 模型又称自回归模型,此模型主要根据变量自身之间的相关性来分析并建立相关方程,然后前推计算得到未来的预测值。它的数学表达式为:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_p y(k-p) + \varepsilon(k) = \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \varepsilon(k) \quad (1)$$

式中,  $a_1, \dots, a_p$  是 AR 模型的参数,  $\varepsilon(k)$  代表建模及测量等随机因素产生的误差。电力系统是一个时变的动态系统,所以  $a_1, a_2, \dots, a_n$  是变量,反映以往各输出量的权重。

根据  $N$  次测量和每次由  $P$  个不同时刻的直接测量的功角,可将上式写成矩阵形式:

$$\tilde{y}(N) = \Phi(N) a_p(N) + E(N) \quad (2)$$

式中,

$$\tilde{y}(N) = [y(N-1) \quad y(N-2) \quad \dots \quad y(N-P)]^T \quad R^N \quad (3)$$

$$E(N) = [e_1(N) \quad e_2(N) \quad \dots \quad e_P(N)]^T \quad R^N \quad (4)$$

$$\Phi(N) = \begin{bmatrix} \vartheta_1^T \\ \vartheta_2^T \\ \dots \\ \vartheta_P^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) & (-1) & \dots & (1-P) \\ (1) & (0) & \dots & (2-P) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (N-1) & (N-2) & \dots & (N-P) \end{bmatrix} \quad R^{N \times P} \quad (5)$$

$$a_p(N) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_p]^T \quad R^P \quad (6)$$

$N$  为测量次数,  $P$  为模型阶数,  $N > P$ 。

若使预测准确,关键就是确定模型参数,从而使误差最小。这里按照模型的误差的方差为最小来求  $a_p(N)$ 。设  $M = E^T(N) E(N)$ ,若使  $M$  为最小值,则  $\frac{\partial M}{\partial (a)} = 0$ ,

$$\Rightarrow a_p(N) = [\Phi^T(N) \Phi(N)]^{-1} \Phi^T(N) \tilde{y}(N) = Q_N^{-1} \Phi^T(N) \tilde{y}(N) \quad (7)$$

$$Q(N) = [\Phi^T(N) \Phi(N)]^{-1} \quad (8)$$

所以,在  $N$  时刻的预测值为:

$$\Rightarrow \hat{y}(N) = \vartheta_N^T a_p(N) \quad (9)$$

在  $N+1$  时刻,得到一个新的测量值  $y(N+1)$ ,

因为模型参数  $a_p(N)$  是时变的,要根据老的参数和新的测量值来实时修改:

$$\Rightarrow \hat{y}_p(N+1) = \hat{y}_p(N) + K_{N+1} [y(N+1) - \vartheta_{N+1}^T \hat{y}(N)] \quad (10)$$

式中,  $K_{N+1}$  为时变的,为增益矩阵。

$$\begin{cases} K_{N+1} = \frac{Q_N \vartheta_{N+1}}{\vartheta_{N+1}^T Q_N \vartheta_{N+1} + 1} \\ Q_{N+1} = \frac{1}{\lambda} \left[ I - Q_N \frac{\vartheta_{N+1} \vartheta_{N+1}^T}{\vartheta_{N+1}^T Q_N \vartheta_{N+1} + 1} \right] Q_N \end{cases} \quad (11)$$

$I$  为单位对角矩阵;  $\lambda$  为加权因子,对历史数据进行加权,加强当前数据的作用。

则下一时刻的预测值为:

$$\hat{y}(N+1) = \vartheta_{N+1}^T \hat{y}_p(N+1) \quad (12)$$

综上,不断用新的功角值来修正预测模型参数,使模型不断跟踪并预测新的功角变化,提高预测精度。

在实际应用中,对某一时刻的预测模型参数  $\hat{y}_p(i)$ ,要预测的不仅仅是下一采样时刻的功角,还要根据实际预测的需要,进行若干步预测,即:

$$\text{对某一固定 } \hat{y}_p(i), \text{ 预测 } l \text{ 步: } \hat{y}(i) \quad \hat{y}(i+1) \quad \dots \quad \hat{y}(i+l)$$

$l$  为预测长度,由规定的预测精度和预测的要求决定。

在没有足够的采样值的情况下,是无法进行自回归预测的,此时可以用线形外推法来进行初步预测,在  $K$  时刻有:

$$\hat{y}(K+1) = \hat{y}(K) + \dot{\hat{y}}(K) T \quad (13)$$

其中,  $T$  为采样周期;  $\dot{\hat{y}}(K)$  为发电机的转子的机械角速度,可以在发电机处直接测量。

此法准确性不是很高,只能作为采样值不够时的初步预测。

### 2.3 失步预测保护实现方案

总体保护框图如图 2。

静稳的监视(图 3)

$\hat{\delta}$  为预测功角,  $\delta_{jv}$  为静稳极限角,  $K$  为静稳储备系数,延时  $t_1$  防止稳定振荡时误发信。

加速失步和减速失步的判断。通过在软件中设置一个标志位 sbflag。正常情况下, sbflag = 0;而减速失步时,功角会逐渐减小,并过零,沿负方向增大,此时可以令 sbflag = 1。:

$$\begin{cases} \text{sbflag} = 0 \\ \hat{\delta} > \delta_{dv} \end{cases} \Rightarrow \text{加速失步} \quad (14)$$

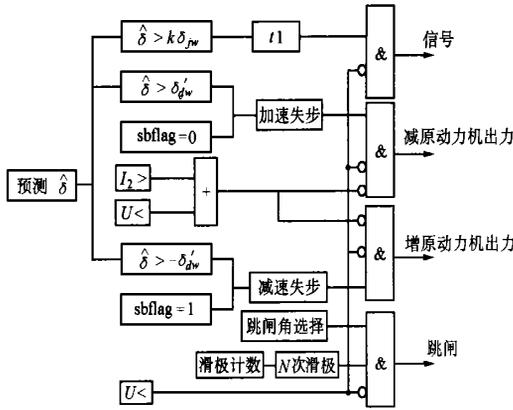


图2 保护总体框图

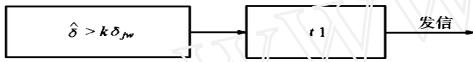


图3 静稳监视框图

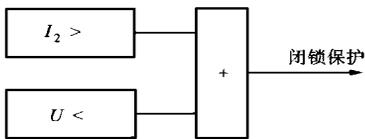


图4 短路闭锁保护框图

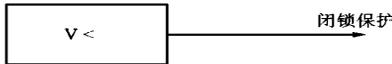


图5 转子低压闭锁保护框图

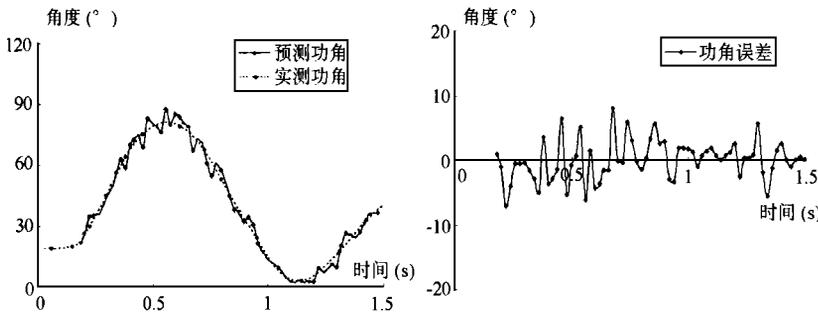


图6 三相短路时功角的预测值与测量值的比较及误差 (200ms 切除)

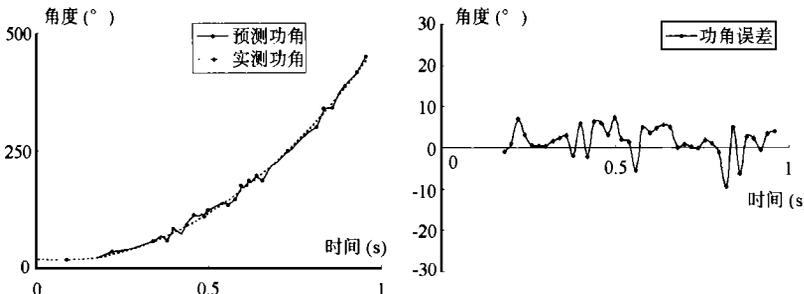


图7 三相短路时功角的预测值与测量值的比较与误差 (500ms 切除)

$$\text{而} \begin{cases} \text{sbflag} = 1 \\ \wedge < -\delta_{dw} \end{cases} \Rightarrow \text{减速失步} \quad (15)$$

由于预测的是发电机空载电势  $\dot{E}_q$  与变压器母线  $\dot{U}_i$  的夹角,并不是功角,所以整定值  $\delta_{dw}$  为动态稳定极限角的折算值,可离线计算。

鉴别短路和振荡(图4)

负序电流判据判不对称短路,低电压可以判对称短路。

转子侧由测速装置引出的比相电压  $v$  如果发生故障,也应闭锁保护(图5)。

### 3 仿真及误差分析

在 MATLAB 环境下建立单机对无穷大母线的双回路系统的仿真模型。功角直接测量的算法和误差的仿真已通过实验<sup>[3]</sup>,表明直接测量的功角和实际功角的最大误差仅为2.4度,在这里不再详述,而直接使用其直接测量的功角值作为预测模型的采样值。对功角预测的仿真分以下两种情况:

- (1)一回线始段三相短路,200ms 切除,发电机未失步。
- (2)一回线始段三相短路,500ms 切除,发电机失步。

仿真效果如图6、图7所示。

算法模型采用四阶模型,四步迭代来预测200ms 之后的功角。仿真结果表明,误差都在  $\pm 8^\circ$  之内,基本能反映功角的变化。虽然有一定误差,但是在预测角到达动态稳定角的时候,并不是将发电机解列,而是采取增减出力等措施,所以允许有一定的波动。

### 4 结论

本文提出了一种利用发电机直接测量的功角值,根据自回归模型来跟踪及预测功角的变化,并在此基础上,提出了一套完整的保护方案,从而可以有效地预测失步,提前采取相应的措施来保护发电机的方法。此法物理概念清晰,保护方案简单灵活,仿真结果表明具有较高的精度。

基于此法的失步及失步预测保护正在进一步研制之中。(下转第26页)

- [5] 郑崇, 韦巍. 基于小波分析的发电机匝间短路故障的智能诊断研究[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(4): 431 ~ 435.
- [6] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [7] 何正友. 电力暂态信号的小波分析方法及其在 EHV 输电线路暂态保护中的应用研究[M]. 西南交通大学博士学位论文, 2000.

收稿日期: 2000-09-05; 改回日期: 2000-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(59977019)

作者简介: 何正友(1970-), 男, 博士研究生, 研究方向为小波分析在继电保护中的应用, 调度综合自动化; 钱清泉(1936-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 牵引动力国家重点实验室主任, 研究领域为信息理论与信号处理、监控及综合自动化。

### Wavelet transform based window singularity exponent computation method and its application in fault detection

HE Zheng-you, QIAN Qing-quan

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Wavelet transform can well describe the singularity of signals. Based on the character of wavelet transform for studying singularity signals, a window singularity exponent is defined by overcoming the difficulty of local singularity exponent computation. The theory signals analysis indicated this exponent can describe the local singularity of signals, and its algorithm is fast and simple. By virtue of EMIDC software, the analysis result for the EHV transmission line fault indicated that this window singularity exponent can be a criterion of power system fault detection and discrimination, this is a new and efficient method for fault detection and protection.

**Key words:** wavelet transform; singularity exponent; fault detection

(上接第 22 页)

#### 参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] 史世文. 大机组继电保护. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 李鹏, 陆于平. 大型发电机微机式失步保护的研究. 电力系统自动化, 1999(11): 24 ~ 27.
- [4] 李国庆. 电力系统暂态稳定预测控制的研究. 电力系统自动化, 1994: 25 ~ 31.

- [5] Brown R D, McClymont K R. A Power Swing Relay for Predicting Generation Instability. IEEE Trans on PAS, 1965, 84(3): 219 ~ 223.

收稿日期: 2000-08-21

作者简介: 严伟(1975-), 男, 硕士研究生, 目前主要研究方向为电力系统继电保护; 陆于平(1962-), 男, 教授, 主要从事电力系统继电保护, 尤其是主设备保护教学和研究工作; 李鹏, (1975-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护研究和开发工作。

### A study on microprocessor-based predictive out of step protection for large generator units

YAN Wei, LU Yurping, LI Peng

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to avoid the problems caused by traditional predictive out of step protection, this paper presents a method to measure the power-angle directly and bring forward an algorithm to predict the variety of power angle. Based on these, a complete microprocessor based predictive out-of-step protection scheme is put forward. The accuracy of the algorithm and the analysis of the error is simulated by using digital simulation. The result shows that the method is more accurate and simpler than those traditional methods. Its clear concept and high accuracy will do good to the predictive out of step protection. Now, the new predictive out of step protection is under developing.

**Key words:** predictive out-of-step; oscillation; power-angle; autoregression model; protection scheme

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告