

# 基于同步相量测量技术的暂态稳定性实时预测

林 飞,张 文,刘玉田

(山东工业大学电力学院,山东 济南 250061)

**摘要:** 提出了一种电力系统稳定性实时预测方案。通过同步相量测量技术获得故障后短时间内的各发电机内电势相量,利用多项式拟合的方法,快速预测系统中各发电机大轴间最大相对摇摆角的变化趋势,从而判定系统的稳定性。方法本身与系统结构、故障情况等无关,适应性较好。对实际系统进行了仿真实验,获得了较为准确的结果。

**关键词:** 电力系统; 暂态稳定; 同步相量测量

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)11-0033-03

## 1 前言

自1993年全球定位系统(GPS)民用化以来,GPS以其授时精度和高可靠性在电力系统中开始获得应用,其中最有意义的是开发了电力系统相量测量技术,使得直接监视系统的相量成为可能,从而将对暂态稳定分析与控制带来巨大的变革。目前,许多国家的电力公司,科研机构 and 高校都相继研制开发了同步相量测量装置,并正在探讨其在电力系统各方面,尤其是暂态稳定预测、控制和失步保护中的应用。美国和法国电力公司已安装了许多PMU装置<sup>[1-3]</sup>。我国最近也开始进行PMU的研制和应用工作<sup>[4,5]</sup>。一个使用PMU加强对电力系统暂态稳定监控的热潮正在各国兴起。

本文提出了一种电力系统稳定实时预测方案。它能直接测量、监视发电机功角、电压相量、有功、无功等参数的动态过程,并实时预测各发电机大轴间最大相对摇摆角,直观地显示在屏幕上,使运行调度人员可以看到功角的变化趋势,掌握系统的稳定运行情况。

## 2 相量测量单元和稳定监测系统

国内外在90年代初已研制出利用GPS构成的相量测量单元PMU,利用它组成了相量监测系统,并进行了现场试验。其主要目的是利用PMU实现对系统相量的测量和监视,构成电力系统实时监控系统,以保证电力系统的安全稳定运行。

### 2.1 相量测量单元 PMU

PMU模块安装在各发电厂和主要变电站,其工作原理是在接收到GPS发出的时钟信号后,把同步采样数据打上时间标签一起传到主站,主站根据时间标签就能得到同一时刻系统各子站的相量。

其中,各子站的PMU原理结构框图如图1所示。变电站子站的PMU主要测量母线的电压相量,目前已有成品。

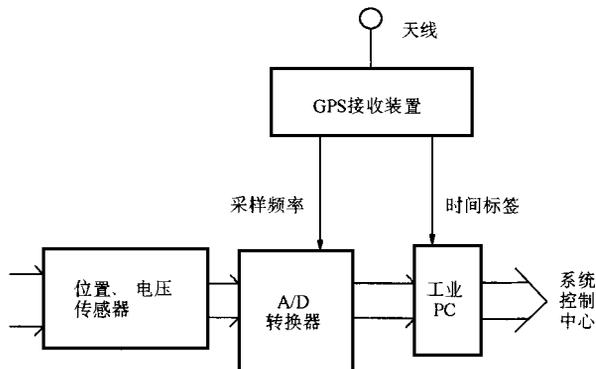


图1 各子站 PMU 原理框图

在发电厂子站,还要通过位置传感器测量发电机内电势相量,与机端电压比较,可获得发电机功角,这对暂态稳定问题尤为重要,因为各发电机大轴间相对位置即相对摇摆角的变化是判断各发电机是否同步运行的标准。目前已有多种方法测量发电机功角,如磁阻传感器法,光电法<sup>[4]</sup>等,在这些方法的基础上,利用GPS统一全网时间,通过简单计算即可得出各发电机间的最大相对摇摆角。

### 2.2 稳定监测系统结构与功能

稳定监测系统的基本结构如图2所示。主站位于电网的调度中心,子站位于所要监控的主力发电厂和枢纽变电站,子站监控装置主要由PMU模块组成。各子站的PMU模块把发电机功角、电压相角等信息通过通信通道传给主站,主站根据这些量通过预测算法对系统最大相对摇摆角的摇摆趋势作出预测。

监测系统主要具有如下的功能:

(1) 显示电压相量图;

- (2) 显示电压相角与发电机功角的实时状态和变化趋势图;
- (3) 进行失稳预测;
- (4) 报警功能;
- (5) 连续事件记录。

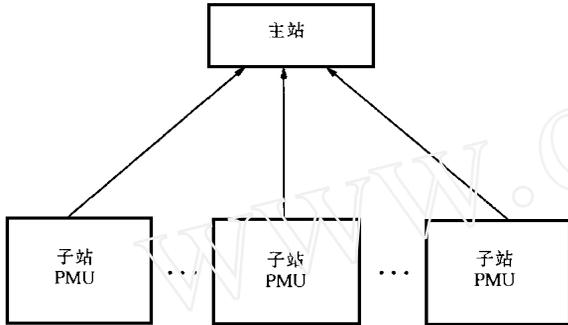


图2 监测系统的基本结构

### 3 摇摆角预测原理

根据各发电厂子站传来的  $t$  时刻各发电机的内电势相位  $i(t)$ , 系统中各发电机转子间最大相对摇摆角可通过下式计算

$$\max(t) = \max | i(t) - j(t) | \quad i, j \in G$$

式中:  $G$  为所有发电机集合。

在故障后的暂态过程中, 最大相对摇摆角是一个随时间连续变化的量。在大量数值仿真比较的基础上, 本文对最大相对摇摆角的趋势预测选用如下的多项式模型:

$$\max(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n + \dots \quad (1)$$

大量仿真结果表明, 当式(1)中的  $n$  取 2 时, 模型的预测精度最高。对于  $m+1$  个测量值,  $a_0, a_1, a_2$  三个参数可以由下面  $m+1$  个方程按最小二乘法得出。

$$\begin{aligned} (t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \\ (t + t) &= a_0 + a_1(t + t) + a_2(t + t)^2 \\ (t + 2 t) &= a_0 + a_1(t + 2 t) + a_2(t + 2 t)^2 \\ &\dots\dots \\ (t + m t) &= a_0 + a_1(t + m t) + a_2(t + m t)^2 \end{aligned}$$

写成矩阵形式

$$= TA \quad (2)$$

其中,  $A$  为  $m+1$  阶列向量

$$= [ (t) \quad (t + t) \quad \dots \quad (t + m t) ]^T;$$

$T$  为  $(m+1) \times 3$  阶矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 \\ 1 & t + t & (t + t)^2 \\ \dots & \ddots & \dots \\ 1 & t + m t & (t + m t)^2 \end{bmatrix}$$

实际应用中, 应从故障初始时刻开始计时, 因此  $t$  一般可取为 0;  $A$  为 3 阶列向量

$$A = [ a_0, a_1, a_2 ]^T$$

在  $m+1$  个量测量的基础上, 根据最小二乘法有

$$A = (T^T T)^{-1} T^T \quad (3)$$

在得到  $a_0, a_1, a_2$  三个参数后, 就可以按下式对以后时刻的功角进行预测

$$\begin{aligned} (t + k t) &= a_0 + a_1(t + k t) + a_2(t + k t)^2 \\ k &= m + 1, m + 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

根据仿真计算的结果比较, 式(4)中的  $m$  取 7 时, 即利用故障后 0 ~ 0.35s 的数据进行预测, 结果比较准确。

式(3)和(4)的计算速度非常快, 计算时间几乎可以忽略不计, 这样, 根据前几个时刻的值, 就能马上得到系统最大相对摇摆角未来的变化趋势了。

实际应用中, 在得到新的  $t + (m + 1) t$  时刻的测量值后, 用它取代第一个测量值, 即采用等维新息模型, 再按上述方法解得新的  $a_0, a_1, a_2$  三个参数, 然后重新进行预测, 依次类推, 可以提高预测精度。

目前电力通信系统的波特率一般可达 4800 ~ 9600bps, PMU 的采样周期为 0.033 ~ 0.083s<sup>[1]</sup>, 在美国邦纳维尔电管局(BPA), 实际运行中的 PMU 到控制中心间的通讯线路每秒可传送 30 个相量信息<sup>[2]</sup>。因此, 按照我国目前的实际情况, 式(4)中的采样周期  $t$  取为 0.05s 比较合适, 即每秒 20 个点。

### 4 仿真结果

对我国某 49 机 248 节点电力系统进行了数字仿真实验, 部分结果如下。

在不同运行方式下, 各线路在不同位置处分别发生单相接地、两相和三相短路故障, 0.1s 保护动作切除该故障线路。通过数值积分得到各种情况下故障后各时刻的最大相对摇摆角。经分析发现其中大致有四种振荡模式, 如图 3 所示, 其中虚线表示数值积分获得的最大相对摇摆角的实际曲线, 模式 1 和 2 不稳定, 模式 3 和 4 稳定。具体特征如下: 模式 1 为持续上升; 模式 2 为上升后又缓慢下降, 然后再

上升;模式3为缓慢上升后振荡下降;模式4为较为平坦的下降。

用本文的算法对这四种摇摆趋势利用故障后0~0.35s的数据进行预测,发现对模式1、3和4均能正确预测其趋势,而对模式2误差较大,如图3所示,星号表示0.35s时PMU测得的8个测量值,圆圈表示预测值。

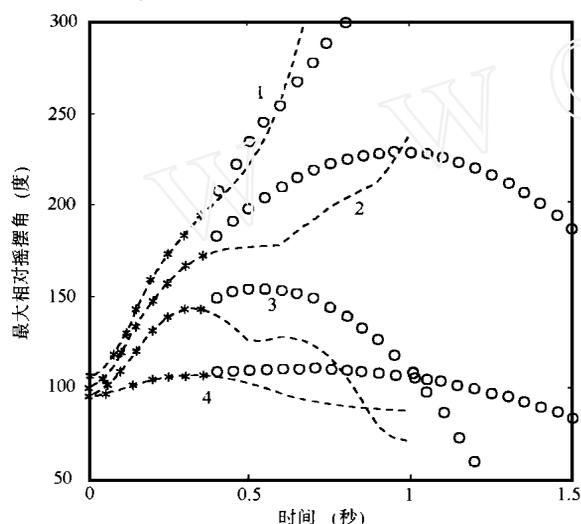


图3 0.35s时预测曲线与实际曲线比较

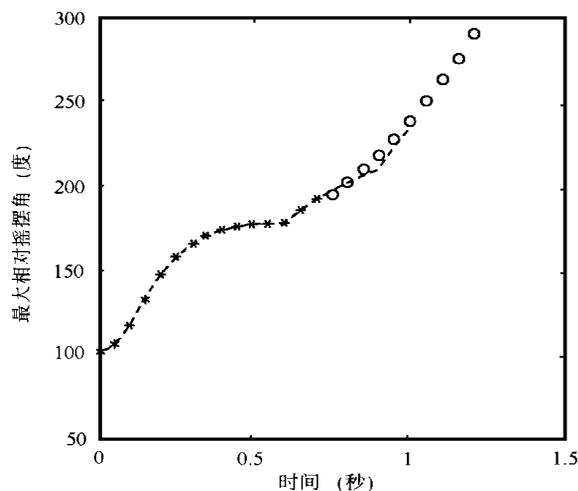


图4 0.7s时的预测曲线

图3中,模式2本来是不稳定的,但预测出它的最终趋势却是稳定的(若按最大摇摆角大于180°为失稳判据,仍能得出系统不稳定的结论)。对于此类模式,可以利用不断传来的测量值继续进行预测,在0.7s时即可作出正确的预测,如图4所示。

## 5 结论

同步相量测量技术的发展给电力系统暂态稳定的分析与控制将带来深刻的影响。本文基于实测获得的发电机内电势相量,利用多项式进行拟合,快速预测发电机间最大相对摇摆角的变化趋势,并显示在屏幕上,以供运行人员参考。本文方法简单,概念清楚;与系统结构、参数及故障情况等无关,能较好地适应各种不同实际运行情况。

## 参考文献:

- [1] Phadke AG. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems. IEEE Computer Application in Power, 1993, (4): 10~15.
- [2] Burnett RO et al. Synchronized Phasor Measurements of A Power System Event. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(8): 1643~1649.
- [3] Kosterev DN et al. Feasibility Study of Using Synchronized Phasor Measurements for Generator Dropping Controls in The Colstrip System. IEEE Transactions on Power systems, 1998, 13(8): 755~761.
- [4] 董清,等. 同步发电机功角转速测量装置. 华北电力大学学报, 1999, 26(7): 7~10.
- [5] 李国庆,等. 基于外部观测的电力系统暂态稳定性实时预测和控制方法. 电网技术, 1995, 19(1): 17~22.

收稿日期: 2000-01-08

基金项目: 山东省自然科学基金(Q97F08154)和清华大学国家实验室基金(国重电010)资助课题。

作者简介: 林飞,硕士,清华大学博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。

## PMU based transient stability predication in power system

LIN Fei, ZHANG Wen, LIU Yurtian

(Shandong University of Technology, Jinan 250061, China)

**Abstract:** This paper presents a polynomial method to fast predicate tendency of maximum relative swing angle using postfault generator rotor angles measured by synchronized phasor measurement units, then to determine transient stability. This method is independent of the characters both of power system structure and faults. The effectiveness of the method is demonstrated by computer simulated results of an actual power system.

**Keywords:** power system; transient stability; PMU