

# 基于 PMU 的电力系统暂态稳定实时快速预测的研究

吕志来, 张保会, 哈恒旭

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 提出一种基于 PMU 对发电机实时测量功角来预测电力系统暂态稳定性的方法。通过采集功角数据, 用多项式逼近去快速预测它未来的变化, 同时为提高精度采用智能动态修正, 然后判断多项式是否存在极值, 若存在可预测系统首摆稳定, 反之则不稳定。仿真结果表明, 该方法对首摆稳定性的预测是准确和有效的。

**关键词:** 暂态稳定; 相量测量单元(PMU); 预测; 智能修正

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)01-0003-03

## 1 引言

联合电力系统的稳定运行是现代电力系统的根本要求, 大电网中最常见的稳定性事故, 仍首推同步运行稳定性破坏, 即系统发生失步振荡<sup>[1]</sup>。

为了有效控制电力系统暂态不稳定性, 以前电力系统预测稳定性曾提出许多办法, 如仿真法、直接法等, 但它们都有一个共同的特点是过于依赖模型和参数的准确性。随着计算机技术和通讯技术的发展, 尤其是全球定位系统(GPS)的出现, 使得对电力系统具有重要作用的相角测量得以实现。目前国内相继研制出基于 GPS 技术的相角测量装置, 并开展了基于相角测量的电力系统监视、保护、稳定识别和稳定控制的理论和应用研究。由于相角测量使得人们能实时地“看到”系统的状态, 必将极大地改善系统暂态稳定预测及控制的水平。本文提出一种基于相量测量单元(PMU)实时测量发电机的功角<sup>[2]</sup>, 并用多项式逼近去快速预测未来的摇摆情况, 并智能动态修正, 然后通过多项式是否存在极值来判断发电机是否失步, 若失步, 则这些发电机应施加控制以便使发电机失步倾向消除。其优点是, 基于实测数据进行预测, 无需有关系统情况的任何先验知识, 可以适用于不同系统运行方式及各种不同严重程度和情况的故障, 能更准确地反映系统真实运行情况<sup>[3]</sup>。

## 2 基于 PMU 测量的电力系统暂态稳定性机理分析<sup>[4,5]</sup>

### 2.1 单机系统

收稿日期: 1999-07-23

作者简介: 吕志来(1973-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定及其控制。

图1表示单机系统在暂态稳定时发电机功角和角速度的变化过程。在故障状态下发电机功角和角速度同时增加, 故障切除后, 发电机减速, 但功角仍然增加, 在转速偏差降为负值以后, 功角开始回摆, 即功角曲线存在极值点, 则发电机首摆稳定。

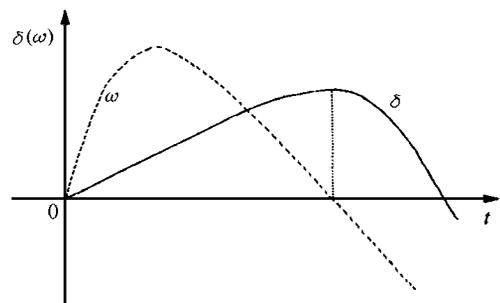


图1 故障后系统的  $\delta$  和  $\omega$  的变化(稳定)

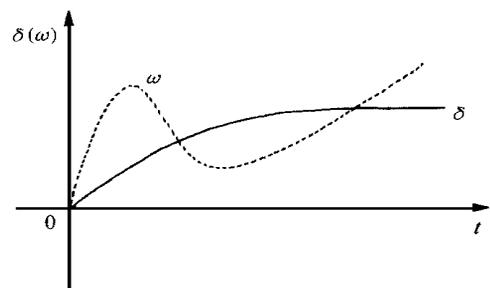


图2 故障后系统的  $\delta$  和  $\omega$  的变化(不稳定)

图2表示单机系统在暂态不稳定时发电机功角和角速度的变化过程。如果角速度恢复过程中比较慢, 当功角增大到超过临界功角时角速度偏差仍然未降到零值, 这时发电机机械功率大于电磁功率, 角速度重新增加, 功角将单调增大, 从 PMU 观测来看暂态稳定或不稳定情况的特征是, 若功角摆到一定程度后开始回摆, 即功角变化曲线存在极值, 则暂态稳定; 反之, 若功角单调增长, 即功角变化曲线

不存在极值,则暂态不稳定。

## 2.2 多机系统

对于多机系统变化过程要复杂得多,故障发生时有些发电机组角速度增长,另一些发电机组角速度可能是下降。故障清除后发电机转速将要下降(或上升),相应地功角一直在增加(或减少)到临界功角以前,角速度偏差已经变号或穿过零值,则功角减少(或增加),首摆是稳定的,反之,如果功角增加或减少到临界功角时,角速度偏差尚未变号,这时发电机转子将反向加速,角速度偏差将不会变号,功角将会单调地增加(或减少),这时首摆是不稳定的。

## 3 基于 PMU 的预测和智能动态修正实现方法

不管电力系统网络结构如何,不管暂态是稳定还是不稳定。在暂态过程的短时间内,第  $i$  台发电机功角总可以看到一个连续变化的时间过程  $i(t)$ 。应用时序分析技术,功角预测可采用以下多项式模型。

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

这里  $i(t)$  表示  $i(t)$  的预测值,参数  $a_i$  是根据历史上实测数据的估算值,在某一时间之前已经预测到  $M+1$  个功角值,假定它们是:  $i(0)$ 、 $i(t)$ 、 $\dots$ 、 $i(M t)$ 。根据最小二乘法,模型中参数向量写成矩阵形式为下:

$Y(M) = H(N) * A_n$ , 式中  $A_n = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$  为参数向量,  $Y(M) = [i(0) \ i(t) \ \dots \ i(M t)]^T$  为 PMU 测量功角向量。

$$H(N) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & t & \dots & (t)^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & M t & \dots & (M t)^n \end{bmatrix} \text{ 为数据矩}$$

阵,  $t$  为采样周期,  $M+1$  个历史数据,  $n$  为预测多项式的阶次。

根据最小二乘法,模型中的参数向量可表示为:

$$A_n = [H^T(N) H(N)]^{-1} H^T(N) Y(M)$$

然后从 0 到  $M t$  的采样数据估算出参数  $a_0 a_1 a_2 \dots a_n$  后,按照多项式的模型,  $H$  步预测估值为下:

$$i(k t) = a_0 + a_1 k t + \dots + a_n (k t)^n, \quad (2)$$

$$k = M+1, M+2, \dots, M+H$$

为了提高预测精度采用滚动预测技术,不断地

采集新数据,不断地更新预测结果。当补充采集一个新数据后,利用最新的  $M+1$  个数据模型形成新的向量,从而得出新的参数估值:

$$A_{\text{new}} = [H^T(N) H(N)]^{-1} H^T(N) Y_{\text{new}}(M)$$

在多步预测时,依据以上所建立的预测模型,以预测值递推代入预测模型,可逐步推算出多步的未来值,这样的多步预测过程在获得单步预测结果时,就已经存在着预测误差,可表示为  $e_k = [i(k) - i(k)^j]^2$ ,在逐步递推过程中,以  $i(k)$  及其后来的预测结果作为参数,就引入了误差,并随预测值增加,累积误差增加,多步预测精度下降。为了提高多步预测精度,通过在线实时模糊调整预测输出量。在  $n$  时刻,将检测到的实际输出值  $i(t)$  与预测输出值  $i(t)$  作一比较,求出其偏差  $e(t) = i(t) - i(t)$ ,偏差变化率  $ec = e(t) - e(t-1)$ ,模糊控制器的输入是  $e, ec$ ,输出是对下一时刻功角预测的修正量。

模糊模型结构采用以下解析表达式<sup>[6]</sup>:

$$U(k) = \alpha E + (1 - \alpha) EC \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为修正因子,且  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $\alpha$  为取整。该模型涉及三个语言变量,误差  $E$ 、误差变化率  $EC$  和修正量的变化  $U$ ,每个语言变量取七个语言值  $PB$ (正大)、 $PM$ (正中)、 $PS$ (正小)、 $0$ (零)、 $NS$ (负小)、 $NM$ (负中)、 $NB$ (负大)。对其定义  $PB = 3, PM = 2, PS = 1, 0 = 0, NS = -1, NM = -2, NB = -3$ 。

在本算法中,在线智能修正的任务主要是在线修正因子  $\alpha$ ,式(3)中  $\alpha$  的大小直接表示对偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  的加权程度,这恰好反映了我们操作者控制活动的思维特点,即当  $|E|$  大,  $\alpha$  大,修正作用主要用于消除误差;当  $|E|$  小,  $\alpha$  也小,  $U$  中  $EC$  所占的比例增加,修正作用主要用来消除误差的变化,使系统保持稳定。

依此思想,将模糊化为模糊集  $VS, S, M, B, VB$ ,分别对应的模糊单点集为:  $0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ,调整修正因子  $\alpha$  的规则为:

- (1) IF  $|E| = PB$  THEN  $\alpha_1 = VB$
- (2) IF  $|E| = PM$  AND  $|EC| = PB$  OR  $PM$  THEN  $\alpha_2 = M$
- (3) IF  $|E| = PM$  AND  $|EC| = PS$  OR  $0$  THEN  $\alpha_3 = B$
- (4) IF  $|E| = PS$  AND  $|EC| = PB$  OR  $PM$  THEN  $\alpha_4 = S$
- (5) IF  $|E| = PS$  AND  $|EC| = PS$  OR  $0$  THEN  $\alpha_5 = B$
- (6) IF  $|E| = 0$  AND  $|EC| = PB$  OR  $PM$  OR  $PS$  THEN

$\delta_6 = VS$

(7) IF  $|E| = 0$  AND  $|EC| = 0$  THEN  $\gamma_7 = M$

对应上述规则,隶属度  $\mu_i(|E|, |EC|)$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) 分别为下式(4)。

- (1)  $\mu_1(|E|, |EC|) = \mu_{EPB}$
- (2)  $\mu_2(|E|, |EC|) = \mu_{EPM} (\mu_{CPB} \mu_{CPM})$
- (3)  $\mu_3(|E|, |EC|) = \mu_{EPM} (\mu_{CPS} \mu_{CO})$
- (4)  $\mu_4(|E|, |EC|) = \mu_{EPS} (\mu_{CPB} \mu_{CPM})$  (4)
- (5)  $\mu_5(|E|, |EC|) = \mu_{EPS} (\mu_{CPS} \mu_{CO})$
- (6)  $\mu_6(|E|, |EC|) = \mu_{E0} (\mu_{CPB} \mu_{CPM} \mu_{CPS})$
- (7)  $\mu_7(|E|, |EC|) = \mu_{E0} \mu_{CO}$

在实时修正中,在线计算  $e$  和  $ec$ ,将其模糊化,然后利用式(4)计算出  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ),再利用式(5)实时计算出  $\gamma$ ,最后利用式(3)计算出修正量的变化,再乘以比例因子即可得到实际的修正量。

修正因子为:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^7 \mu_i(|E|, |EC|) \times \delta_i}{\sum_{i=1}^7 \mu_i(|E|, |EC|)} \quad (5)$$

如果功角预测多项式(2)预测的功角经智能动态修正后在某一步  $h$  对应的采样时刻  $h \cdot t$  存在极值,则说明功角变化回摆,该发电机组第一摆稳定,若不存在极值,则说明该发电机功角变化呈单调上升或发散趋势,该机组不稳定。

## 4 仿真结果

这里采用复杂模型(包括调压器、调速器、负荷等的影响)对电科院6机22节点进行了大量仿真计算以检验本文所提方法的有效性<sup>[8]</sup>。限于篇幅举一例故障为  $t = 0s$  时母线19-14发生三相短路(短路靠近19)。分析表明当电力系统出现严重故障时,只有部分严重受扰机组会发生失步现象。这里严重受扰机组为4号机。对它进行详细观测和仿真,仿真时预测模型的阶数  $n = 4$ ,采样周期  $t = 0.01s$ 。用数值积分法求得该故障下的临界切除时间  $CCT = 0.30s$ 。

当故障切除时间为  $0.25s$  时,它的仿真曲线如图3的实线所示,预测曲线如图3中带虚线所示,其变化情况与数值积分法基本一致,且都存在极值,系统稳定,预测结果正确。当故障切除时间为  $0.30s$  时,它的仿真曲线如图4的实线所示,预测曲线如图4中带虚线所示,其变化情况与数值积分法基本一致,不存在极值,系统失稳,预测结果正确。仿真时我们发现只需网络最后一次操作后的两到三个采

样周期的实测数据,并结合故障期间的数据和智能修正即可预测系统的首摆稳定性。仅仅通过故障期间的少许实测数据就能达到预测后期发电机的摇摆情况的想法是我们追求的目标,但实际在理论和工程上也许难以实现。

需要说明一点,预测模型阶数  $n$  选择的不同将使预测的准确性和计算速度不同,一般来讲  $n$  越大,预测精度越高,但计算时间加长; $n$  越小,预测误差相对增大,但计算时间快。由于本文采用了智能动态修正,取不同  $n$  值进行仿真后发现,  $n = 4$  时可满足预测精度,且计算快速。

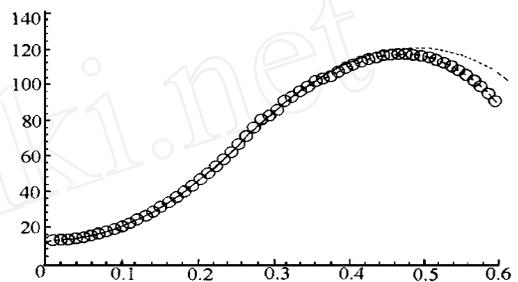


图3 故障切除时间为  $0.25s$  时的仿真和预测曲线

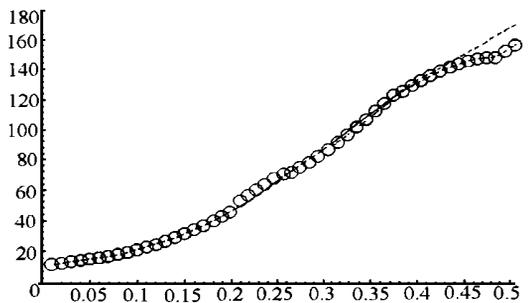


图4 故障切除时间为  $0.30s$  时的仿真和预测曲线

## 5 结束语

本文提出的电力系统暂态稳定性实时快速预测是基于PMU外部实测实现的,仿真结果表明,通过多项式逼近和智能动态修正相结合,在满足速度的条件下提高了预测精度,能可靠判断首摆稳定性,且技术上易于实现。另外通过实测来反映系统的运行方式变化改变了必须知道系统的网络结构、参数等才能判稳的局限性。

## 参考文献:

- [1] 王梅义,吴竟昌,蒙定中.大电网技术(第二版).北京:中国电力出版社,1995. (下转第9页)

故障。

$$| -180^\circ | > \quad (4)$$

式中  $\theta$  为一阈值。

## 6 结论

本文提出了一种针对电网多出线节点来选定短路故障线路的方法,数字仿真计算结果证明该方法正确,我们还可以得到如下结论:

(1) 本判据只取用就地信息,不依赖通讯手段,易于实现。

(2) 由“鉴幅鉴相特性突变”作为选择短路故障

线路的判据,简单可靠,工程上运用方便。

(3) 故障越严重判据灵敏度越高。

(4) 经波形变换和脉冲合成,检测出电压、电流过零时的相角差,计算迅速。

(5) 此方法抗干扰力强,电网中冲击负荷对该判据没有影响。

## 参考文献:

- [1] 何仰赞等. 电力系统分析. 武汉:华中理工大学出版社, 1985.
- [2] 宋建成等. 基于功率因数检测的矿井低电压相敏保护的研究. 电网技术, 1999, (2).

### Ascertain fault line based on the jump of angle of power factor

LUO Jun-tao, CHEN Yun-ping, CAO Hua-zhen

(Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, the School of Electric Engineering, Wuhan 430072)

**Abstract:** In this paper, a new method is applied to ascertain the fault line by using "the jump of angle of power factor". In large-scale power systems, emergency control needs lots of information, the operation of controlling must be fast, it is very important to ascertain the fault location immediately and accurately. At the multi-line bus of power systems, we can ascertain the fault line by using "the jump of magnitude and power factor" as judgment. It needn't remote signals and is very independent. The simulation results show that this methods simple and reliable, to ascertain fault line quickly accurately and effectively.

**Keywords:** angle of power factor; emergency control

(上接第 5 页)

- [2] Liu C W, Thorp. Application of synchronised phasor measurements to real-time transient stability prediction. IEE Proceeding-C, 1995, 142(4): 355 ~ 360.
- [3] Haque M H, Msc, Phd, Rahim A H M A, Phd. Determination of first swing stability limit of multimachine power systems through Taylor series expansions. IEE Proceeding C, 1989, 136(6): 373 ~ 379.
- [4] 孙建华. 一种电力系统暂态稳定性快速实时预测方法.

中国电机工程学报, 1993, (6): 60 ~ 66.

- [5] 李国庆, 孙福军, 任强. 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, (1): 17 ~ 22.
- [6] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制理论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.
- [7] 夏道止. 电力系统分析(下册). 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [8] 电力系统分析综合程序(PSASP)稳定用户手册. 北京: 电力科学研究院, 1993.

### Real-time transient stability prediction for multi machine power system based on phasor measurement units

L ÜZhi-lai, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu

(Xi'an Jiaotong University, School of Electrical Engineering, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper presents a fast real-time transient stability prediction method based on synchronised phasor measurements. By collecting phasor data, then phasor change is obtained by polynomial approaching. At the same time, phasor is modified by intelligent control. If polynomial have extremum, first swing is stable, contrariwise it is unstable. The digital simulation verifies the high accuracy and effectiveness of provided algorithm.

**Keywords:** transient stability; phasor measurement unit (PMU); prediction; intelligent modify