

基于 WAMS的电力系统暂态稳定的快速预测

赵建成¹, 谢小荣², 穆钢¹

(1. 东北电力学院电力系, 吉林 吉林 132012; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 提出一种基于广域测量系统 WAMS(Wide-area Measurement System)的电力系统暂态稳定实时快速定量分析的方法。该方法根据 PMU 实时采集的各发电机转子角速度及电磁功率, 通过预测扰动结束后系统运动轨迹和基于暂态能量的轨迹分析法来评估系统的暂态稳定性。在 6机系统上进行仿真计算, 结果表明, 该方法能有效预测电力系统的暂态稳定性。

关键词: 同步相量; 广域测量系统 (WAMS); 暂态稳定; 暂态能量; 快速预测

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)07-0001-05

0 引言

在电力系统丧失同步稳定运行之前,若能预测失步的出现,及早采取合理控制措施可以避免失步事故的发生;即使在故障情况下采取的紧急控制措施对于防止事故的扩大也具有重要的意义。在实施控制措施之前,需要进行快速、准确的暂态稳定预测。预测结果的准确与否直接关系之后的控制决策的选取。

目前已经提出的电力系统暂态稳定预测方法有:数值积分法,直接法,人工智能法等。但它们的缺点或是依赖于模型以及参数;或是当系统规模较大时,训练过程将非常困难。20世纪90年代初,基于全球定位系统 GPS(Global Positioning System)的相量测量单元 PMU(Phasor Measurement Unit)的成功研制,标志着同步相量技术的诞生。在高速通信网络的支持下,各 PMU采集的带时标的的数据能以较小的延时传至数据中心站,完成同步处理和分析,构成 WAMS。同步向量技术在电力系统中的广泛应用,促进了大电网广域测量系统 WAMS的形成和发展。这是现代电力工业最重要的技术之一^[1~2]。将同步向量技术应用于大电网的稳定控制已经得到广泛的关注^[3]。这为电力系统暂态稳定预测和控制提供了一个新的思路和手段。文献[4~6]根据 PMU采集的数据进行了初步预测判稳,但只能得到稳定与否的结论,具有一定的局限性。本文根据 WAMS提供的实测量,利用“泰勒”级数展开得到的多项式来近似表达发电机转子角速度及电磁功率在扰动结束后动态过程中的变化情况,给出发电机暂

态稳定程度的量化信息。此方法的优点是:基于实测数据进行暂稳预测,无需网络结构及参数等先验知识,可以适用于不同运行方式和各种不同类型、程度的扰动,能准确反映系统真实运动情况^[7]。

1 基于 PMU 实测量的预测方法

采用如下形式的预测模型:

$$x(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$$

这里 $x(t)$ 表示动态变量的预测值, $a_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 是根据历史数据采用最小二乘拟合得到的拟合多项式系数。设有 $m + 1$ 个历史数据,预测多项式阶数为 n ,有如下矩阵方程:

$$X = T \cdot A$$

其中:

$$X = [x(0), x(-t), \dots, x(-m-t)]^T$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -t & \dots & (-t)^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & -m-t & \dots & (-m-t)^n \end{bmatrix}$$

$$A = [a_0, a_1, \dots, a_n]^T$$

根据最小二乘法拟合多项式系数:

$$A = [T^T \cdot T]^{-1} \cdot T^T \cdot X$$

这样,由 m 个历史数据得到拟合多项式系数 a_0, a_1, \dots, a_n 后,就可以进行向前 H 步预测,其中第 k 步的预测值为:

$$x(k \cdot t) = a_0 + a_1 \cdot (k \cdot t) + \dots + a_n \cdot (k \cdot t)^n \\ (k = 1, 2, \dots, H)$$

实际应用中,在 WAMS数据站实时接收来自各 PMU子站的同步相量数据,采用滚动数据窗,随时更新历史数据窗,这样得到的拟合多项式系数可以最大程度上反映动态变量此后的变化情况。在系统

发生扰动结束时刻,开始填充预测缓冲区,在缓冲区充满的时刻,进行向前 H 步预测, H 不应超过预测数据缓冲区的长度。

2 基于轨迹的暂态稳定分析方法

随着基于全系统能量函数的直接法应用的深入,到 80 年代初期,人们愈来愈认识到系统的暂态稳定性并不完全与系统中的暂态能量有关。尤其大规模电力系统中更是如此,虽然可以通过对与失稳无关的动能进行修正来提高计算结果的准确性,但这种修正还不能深刻地揭示系统内部的能量关系。Michel 等人于 1983 年提出了用单机能量函数分析系统稳定性的方法,该方法对系统中每一台发电机分别定义一个能量函数,借以描述在暂态过程中该发电机能量的变化情况。轨迹分析法^[8-9]采用单机能量函数作为分析暂态稳定性的工具,以暂态过程中的系统轨迹为信息源,在深入分析临界机能量沿故障后系统轨迹的变化特点之后,在势能达到极大点 t_b 时刻定义了临界机的稳定指标 S_i 和不稳定指标 U_i ,并在势能上升段 (t_{ai}, t_{bi}) 期间定义了临界机的稳定测度函数 $S_i(t)$ 。定义如下:

$$S_i(t) = \frac{dV_{PEi}}{dt} / V_{PEi}(t, t_{ai}) = \frac{-\tilde{P}_{ai}(t)}{V_{PEi}(t, t_{ai})}$$

$$S_i = S_i(t_{bi})$$

$$U_i = \frac{N}{2} M_i \tilde{\omega}_i(t_{bi}) | \tilde{\omega}_i(t_{bi}) | / V_{KEi}(t_{ai})$$

其中:

$$\tilde{P}_{ai}(t) = P_{mi}(t) - P_{ei}(t) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(t)$$

$$V_{PEi}(t, t_{ai}) = \int_{t_{ai}}^t N [-\tilde{P}_{ai}(t)] \tilde{\omega}_i(t) dt$$

式中: M_i 为发电机 i 的惯性时间常数; $\tilde{\omega}_i$ 、 \tilde{P}_{ai} 为发电机 i 相对于惯性中心的转子角速度及相对于惯性中心的加速功率; P_{COI} 为惯性中心的加速功率; V_{PEi} 、 V_{KEi} 为发电机 i 的势能和动能; P_{mi} 、 P_{ei} 为发电机 i 的机械功率和电磁功率; t_{ai} 、 t_{bi} 分别为网络最后一次操作之后发电机 i 的势能某次摆动抵达最小值及最大值的时刻。 $S_i(t)$ 和 U_i 具有明确的物理意义:对于稳定情形,若以 $V_{PEi}(t, t_{ai})$ 作为能量的基值, $|S_i(t)|$ 有着某种至稳定边界距离的意义。关于 $|S_i(t)|$ 在 (t_{ai}, t_{bi}) 上单调下降的性质已经得到证明^[10]。采用标么势能相对于转子角的变化率来衡量稳定程度,使其更具有一般性和可比性。对于不稳定情形,发电机 i 的不稳定程度指标 U_i 的物理意义是:当系统

受扰后势能曲线达到最大值时,发电机 i 耗尽了其最大的吸收动能的能力时,最大注入动能 $V_{KEi}(t_{ai})$ 尚有多大份额未能转化为势能。

3 算例分析

以 6 机系统 (见图 1) 为例做仿真计算,以验证使用本方法量化扰动结束后发电机暂态稳定程度的有效性及合理性。仿真时间为 5 s。图 2 为算法流程图。扰动结束后开始填充预测缓存,首次填满后开始预测发电机 i 的势能 V_{PEi} 、转子角速度 ω_i 以及电磁功率 P_{ei} , 然后根据 ω_i 及 P_{ei} 计算势能预测曲线极大值点处的稳定指标和不稳定指标。取预测模型阶数为 4, 预测数据窗长度为 20, 采样步长为 0.01 s, 向前预测长度为 10, 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 $M+1$ 个历史数据得出新的参数估计值。限于篇幅,本文只给出发电机端发生三相短路故障及网络中发生两相接地短路故障两种情况时的分析结果。

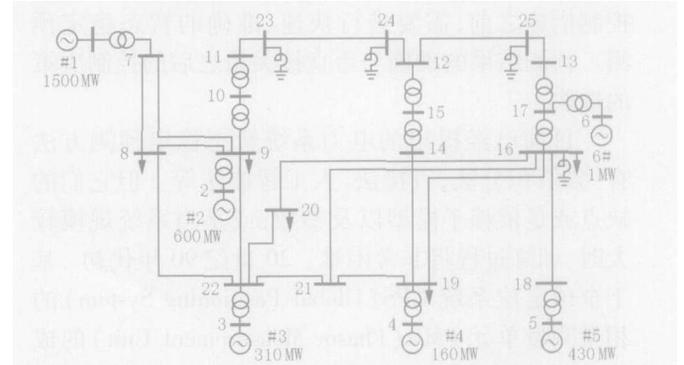


图 1 6机测试系统

Fig 1 Six-machine test system

3.1 机端发生短路故障

故障设在母线 9 处发生三相接地短路故障,极限切除时间为 0.19 s, 2 号机为临界机。

3.1.1 稳定情况

故障切除时间为 0.15 s, 势能仿真曲线在 $t = 0.64$ s 达到极大值时, 对应的 S_i 为 1.86, U_i 为 0.00。为简便, 仅以 2 号机转子角速度为例展示稳定情况时的预测效果。图 3 给出了 2 号机的预测效果对比, 其中细线为仿真曲线, 粗线为取每时刻第 H 步的预测值而得到的曲线。

表 1 给出了 S_i 和 U_i 的变化情况, 其中 $t(s)$ 为实际时刻, $t_{bi}(s)$ 为 $t(s)$ 时刻对应势能预测曲线出现极大值点的时刻, S_i 和 U_i 为 $t_{bi}(s)$ 时刻的稳定指标

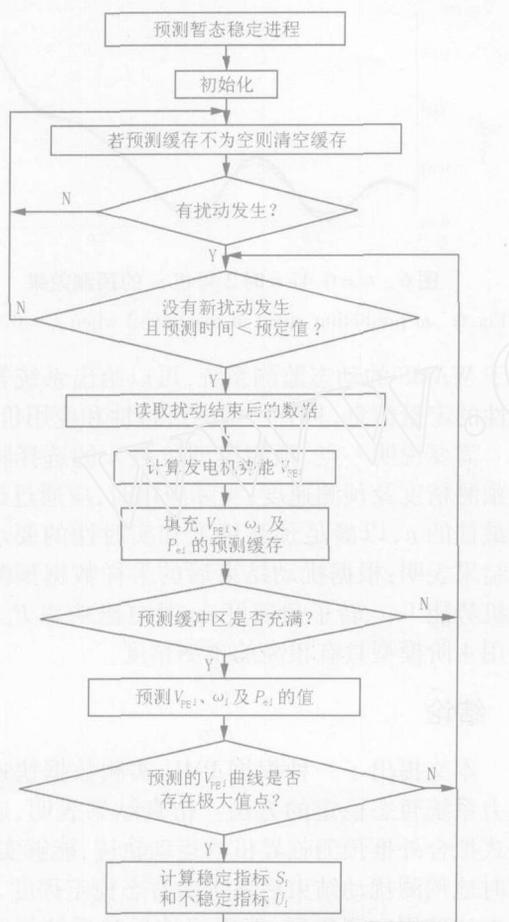


图 2 预测暂态稳定程序流程图

Fig 2 Flow chart of predict transient stability

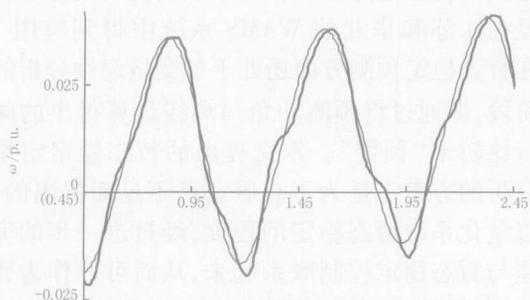


图 3 $t_c = 0.15$ s时 2号机 的预测效果

Fig 3 prediction effect of machine-2 when $t_c = 0.15$ s

和不稳定指标。由表 1 可见, 0.51 ~ 0.64 s 期间, 势能预测曲线存在极值点, 且随着时间的推移, 预测的稳定指标和不稳定指标愈来愈接近仿真值。由此可见, 预测算法对于稳定情况是有效的。

3.1.2 不稳定情况

故障切除时间为 0.21 s, 势能仿真曲线在 $t = 0.76$ s 达到极大值时, 对应的 S_i 为 0.00, U_i 为 0.93。

图 4 给出了 2 号机 w 的预测效果对比, 其中细线为仿真曲线, 粗线为取每时刻第 H 步的预测值而得到的曲线。

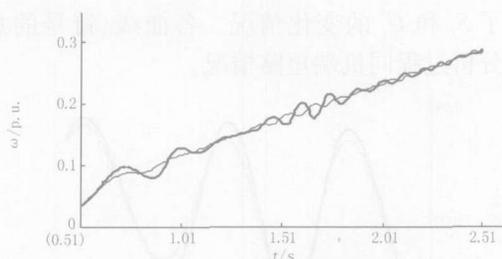


图 4 $t_c = 0.21$ s 时 2 号机 的预测效果

Fig 4 prediction effect of machine-2 when $t_c = 0.21$ s

表 2 给出了 S_i 和 U_i 的变化情况, 其中 $t(s)$ 、 $t_{bi}(s)$ 、 S_i 和 U_i 的意义同表 1。由表 2 可见, 0.65 ~ 0.76 s 期间, 势能预测曲线存在极值点, 且随着时间的推移, 预测的稳定指标和不稳定指标愈来愈接近仿真值。由此可见, 预测算法对于不稳定情况同样有效。

表 1 $t_c = 0.15$ s 时 2 号机的暂态稳定预测结果

Tab 1 Transient stability prediction result of machine-2 when $t_c = 0.15$ s

t/s	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57
t_{bi}/s	0.59	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.60
S_i	-1.49	-1.85	-1.97	-2.03	-1.99	-1.99	-1.96
U_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t/s	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64
t_{bi}/s	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64
S_i	-1.93	-1.91	-1.91	-1.89	-1.89	-1.88	-1.86
U_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 2 $t_c = 0.21$ s 时 2 号机的暂态稳定预测结果

Tab 2 Transient stability prediction result of machine-2 when $t_c = 0.21$ s

t/s	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70
t_{bi}/s	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73
S_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_i	0.46	0.81	0.75	0.50	0.27	0.16
t/s	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76
t_{bi}/s	0.75	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76
S_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_i	0.21	0.52	0.72	0.82	0.89	0.93

3.2 网络中发生短路故障

设在母线 7、8 之间的线路距母线 8 的 30% 处发生两相接地短路故障, 极限切除时间为 0.45 s, 2 号机为临界机。

3.2.1 稳定情况

故障切除时间为 0.42 s, 势能仿真曲线在 $t = 0.95$ s 达到极大值时, 对应的 S_i 为 -2.84, U_i 为 0.00。图 5 给出了 2 号机 的预测效果对比。表 3 给出了 S_i 和 U_i 的变化情况。各曲线、符号的意义以及分析过程同机端短路情况。

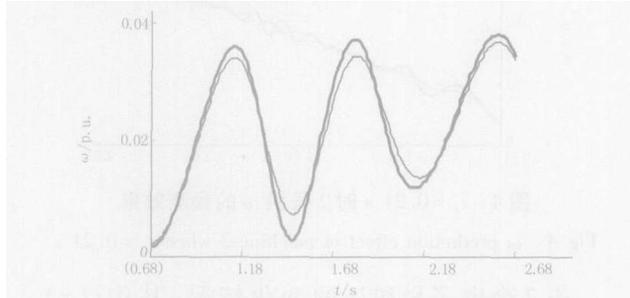


图 5 $t_c = 0.42$ s 时 2 号机 的预测效果

Fig 5 prediction effect of machine-2 when $t_c = 0.42$ s

表 3 $t_c = 0.42$ s 时 2 号机的暂态稳定预测结果

Tab 3 Transient stability prediction result of machine-2 when $t_c = 0.42$ s

t/s	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
t_{bi}/s	0.91	0.92	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94
S_i	-4.00	-3.77	-3.61	-3.49	-3.32	-3.28	-3.18
U_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t/s	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
t_{bi}/s	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95
S_i	-3.10	-3.05	-3.00	-2.97	-2.91	-2.87	-2.84
U_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3.2.2 不稳定情况

故障切除时间为 0.47 s, 势能仿真曲线在 $t = 2.84$ s 达到极大值时, 对应的 S_i 为 0.00, U_i 为 0.89。图 6 给出了 2 号机 的预测效果对比。表 4 给出了 S_i 和 U_i 的变化情况。各曲线、符号的意义以及分析过程同机端短路情况。

表 4 $t_c = 0.47$ s 时 2 号机的暂态稳定预测结果

Tab 4 Transient stability prediction result of machine-2 when $t_c = 0.47$ s

t/s	2.71	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77
t_{bi}/s	2.81	2.82	2.82	2.82	2.82	2.83	2.83
S_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_i	0.86	0.85	0.85	0.84	0.85	0.82	0.83
t/s	2.78	2.79	2.80	2.81	2.82	2.83	2.84
t_{bi}/s	2.83	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
S_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_i	0.84	0.83	0.85	0.84	0.86	0.88	0.89

由以上的机端发生短路故障以及网络中发生短路故障的算例可以得出, 利用扰动结束后预测临界

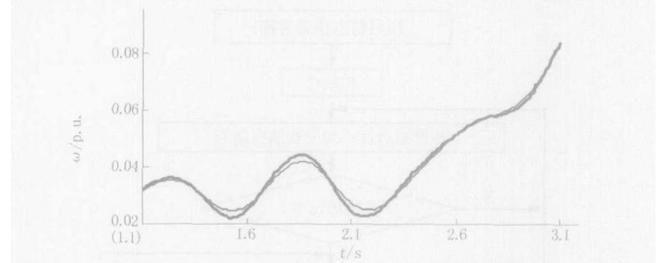


图 6 $t_c = 0.47$ s 时 2 号机 的预测效果

Fig 6 prediction effect of machine-2 when $t_c = 0.47$ s

机的运动轨迹来分析系统的稳定性这种方案, 构建基于 WAMS 的动态监测系统, 可以给出系统暂态稳定性的定量信息, 具有一定的可行性和应用价值。

需要说明一点, 预测模型阶数 n 的选择将影响到预测精度及预测速度, 实际应用时, 应通过试验选定最佳的 n , 以满足预测精度和实时性的要求。仿真结果表明: 根据扰动结束后的采样数据预测各发电机势能 V_{PEi} 、转子角速度 $\dot{\delta}_i$ 及电磁功率 P_{ei} 轨迹, 采用 4 阶模型具有很高的预测精度。

4 结论

本文提出了一种根据 PMU 实测数据快速预测电力系统暂态稳定的方法。仿真结果表明, 通过多项式拟合外推预测临界机的运动轨迹, 能够实时、超实时地预测扰动结束后系统的暂态稳定程度, 另外, 本方法使用实测数据, 能很好地反映系统运行方式的变化, 从而无需知道系统的网络结构、参数就能有效地预测暂态稳定程度。基于预测的功角稳定分析已经在江苏和华北的 WAMS 系统中得到应用^[1], 但在暂态稳定预测方面还处于单变量定性分析的初步阶段, 即通过将预测功角与离线计算得出的阈值进行比较来“预警”。本文提出的暂态稳定定量预测分析的方案正是为了克服这种不足而提出的, 它可以量化系统暂态稳定的程度, 经过进一步的完善可望与暂态稳定控制联系起来, 从而可以作为暂态稳定控制策略选取的依据, 这必将极大地提高 WAMS 系统的暂态稳定监测能力。另外, 方案涉及的算法简单且物理意义清晰, 可以工程实现。但应指出, 对于复杂电力系统还需作进一步的研究。

参考文献:

- [1] Phadke A G Synchronized Phasor Measurements in Power System s[J]. IEEE CAP, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态

- 安全分析与监测系统 [J]. 清华大学学报, 1997, 37 (7): 1-6
- HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, L N Kong-xing, et al Three New Front Subjects in Power Systems——FACTS, Intelligent Control and Dynamic Security Analysis and Monitor System Based on GPS[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37 (7): 1-6
- [3] 谢小荣,李红军,吴京涛,等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析 [J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 10-14
- XIE Xiao-rong, LI Hong-jun, WU Jing-tao, et al Feasibility Study on Using Synchrophasor Technology for Power System Transient Stability Control [J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 10-14
- [4] Haque M H, Rahim A H M A. Determination of First Swing Stability Limit of Multimachine Power Systems through Taylor Series Expansions [J]. IEE Proceedings C, 1989, 136 (6): 373-380
- [5] Liu C W, Thorp. Application of Synchronized Phasor Measurements to Real-time Transient Stability Prediction [J]. IEE Proceeding C, 1995, 142 (4): 355-360
- [6] 林飞,张文,刘玉田. 基于同步相量测量技术的暂态稳定性实时预测 [J]. 继电器, 2000, 28 (11): 33-35
- L N Fei, ZHANG Wen, L U Yu-tian PMU Based Transient Stability Prediction in Power System [J]. Relay, 2000, 28 (11): 33-35
- [7] Haque M H, Msc, Phd, et al, Determination of First Swing Stability Limit of Multimachine Power Systems through Taylor Series Expansions [J]. IEE Proceeding C, 1989, 136 (6): 373-379
- [8] 穆钢. 基于暂态能量的轨迹分析方法及其在电力系统暂态稳定分析中的应用 (博士学位论文) [D]. 北京: 清华大学, 1991
- MU Gang Transient Energy Track Based Analysis Approach and the Application to Transient Stability Analysis in Power Systems, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: Tsinghua University, 1991
- [9] 穆钢. 暂态稳定性的定量分析——轨迹分析法 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (3): 23-30
- MU Gang The Quantitative Analysis of Transient Stability——Track Based Analysis Approach [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (3): 23-30
- [10] 穆钢,王仲鸿,韩英铎,等. 关于稳定测度函数的性质及稳定指标之有效性的证明 [J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (2): 60-66
- MU Gang, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo, et al A Proof on Property of the Stability Measurement Function and Validity of the Stability Index [J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14 (2): 60-66
- [11] 罗建裕,王小英,鲁庭瑞,等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 78-80
- LUO Jian-yu, WANG Xiao-ying, LU Ting-rui, et al An Application of Power System Real-time Dynamic Monitoring System Based on Wide-area Measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24): 78-80

收稿日期: 2004-07-16; 修回日期: 2004-08-07

作者简介:

赵建成 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: zjc_790831@126.com

谢小荣 (1975 -), 男, 助理研究员, 目前研究方向为电力系统广域动态监测与稳定控制;

穆钢 (1957 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、负荷预测、输电网网损分析。

WAMS-based real-time prediction of transient stability for multimachine power systems

ZHAO Jian-cheng¹, XIE Xiao-rong², MU Gang¹

(1. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new real-time quantitative method for transient stability analysis is proposed. This method employs data collected by WAMS (Wide-area Measurement System), including generator rotor speed and electromagnetic power, to predict transient stability of power systems. The underlying principle is quick prediction of the dynamic trajectory of disturbed power system and transient-energy based trajectory analysis. Simulation with a six-machine test system validates the effectiveness of the proposed method.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50323002).

Key words: synchronous phasor; WAMS; transient stability; transient energy; real-time prediction