

基于相轨迹凹凸性的电力系统暂态稳定性识别

谢欢¹, 张保会¹, 于广亮¹, 李颖晖², 李鹏¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

2. 空军工程大学工程学院, 陕西省 西安市 710038)

Power System Transient Stability Detection Theory Based on Characteristic Concave or Convex of Trajectory

XIE Huan¹, ZHANG Bao-hui¹, YU Guang-liang¹, LI Ying-hui², LI Peng¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China ;

2. School of Electrical Engineering, Airforce Engineering University of PLAC,

Xi'an 710038, Shaanxi Province, China;)

ABSTRACT: With the application of APMU (angle & Phase Measurement Unit) based on GPS (Global Position system) in power system, online system transient instability detection becomes feasible. It is of great significance to transient stability emergent control that out-of-step condition is as soon as possible detected. This paper is concerned with faster transient instability detection for online application. A supposition is strictly proved, and an improved instability detection method is presented, which is independent of the network structure, system parameters and model because of using observation data. During the process of proof, damp coefficient is considered in system model to keep it more reasonable. According to the geometric characteristics of system trajectory, a new index Δk is defined and used to identify system transient instability. The simulation results show that the detection theory of transient instability is correct, and the improved index is more effective than the pre-used method. Since the index is reliable and requires less computational time, it can be applied to the design of out-of-step relaying.

KEY WORDS: Power system; Characteristic concave or convex of surface; Transient stability detection

摘要: 随着基于 GPS 的功角测量技术在电力系统中的广泛应用, 在线识别系统不稳定成为可能, 其对于暂态稳定紧急控制具有重要意义。该文研究了一种更快的在线暂态不稳定识别方法。在严格证明了一个猜想正确性的基础上, 提出了一种改进的不稳定性识别方法, 该方法仅使用了观测数据, 而不受运行时刻网络的结构、系统参数和模型影响。证明过程中, 模型计及了阻尼参数的影响, 从而保证了证明过程更加合理。文中根据系统轨迹的凹凸性定义, 还提出了一种新的判据指标 Δk , 用来识别系统的不稳定。仿真结果显示了该识别原理的正确性, 以及能够更快地更有效地识别出系统不

基金项目: 国家自然科学基金项目(50595413)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595413).

稳定。由于该方法的可靠性和要求很少的计算量, 能够实际应用于失步保护设计中。

关键词: 电力系统; 相图凹凸性; 暂态稳定性识别

1 引言

电力系统常遭受一些大的扰动, 如短路故障、大功率负荷的投切等^[1]。故障后, 若系统不能恢复到某一平稳状态, 则系统是不稳定的^[2-3]。为了阻止系统失稳的发生, 需在短暂的时间内投入各种紧急自动控制装置, 包括切机、切负荷, 投入制动电阻及快关汽门的控制等。紧急控制装置尽快地投入对系统的暂态稳定至关重要^[4]。而在线的暂态不稳定性快速识别能为紧急控制装置的投入赢得时间。

早期的暂态不稳定识别主要依靠阻抗型发电机失步保护装置, 这一类失步检测装置主要存在动作迟和难以区分失步与不失步振荡的缺点^[5]。随后的研究还进一步提出了反应有功功率及其变化量和反应频率及其变化率的稳定性识别装置。为了提高装置动作的速度以及随着电力系统规模的日益扩大, 全系统的稳定性识别方法成为研究的热点, 例如能量函数法^[6-8]、决策树^[9]和基于人工神经网络的稳定性预测^[10]等方法。能量函数法的关键是找到故障后的主导不稳定平衡点 (UEP), 但 UEP 相当耗时的计算量限制了该方法的在线应用。决策树法和基于人工神经网络的方法都需要大量的离线训练, 电力系统的网络结构、模型参数和运行方式的改变也会影响这类方法的在线应用效果。

随着 GPS 功角测量技术的逐渐成熟^[11-12], 文献[13]提出了一种新的基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定识别思想, 文献[14]将该思想与扩展等面积定则 (EEAC) 方法相结合, 提出了一种针对多机系统与电网结构、模型参数和运行方式无关的快速预测稳定性的方法, 但未能从理论上严格证明该思想的完备性, 而是基于大量仿真结果提出的猜想。

本文在文献[13-14]的研究基础上, 在二维相平面内严格证明了基于相轨迹凹凸的系统暂态稳定性识别理论, 为进一步在高维空间研究和理解该思想奠定了基础, 并根据相轨迹凹凸性定义, 提出了一种新的快速预测系统暂态稳定性的判据, 该方法仅使用了故障后轨迹, 而与电网结构、模型参数、运行方式以及系统平衡点无关。仿真算例验证了上述理论的正确性, 结果显示本文提出的不稳定识别方法本身就具有较强的预测功能, 能够更快速地识别出系统是否失稳。

2 基于相图凹凸的电力系统暂态稳定性识别

文献[13]通过大量的仿真试验发现了系统的相轨迹几何特性能够用来确定系统的稳定性, 进而提出一个猜想, 即稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点总是凹的, 而不稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点在故障切除后立刻或一小段时间后出现凸的特性, 如图 1 所示。文献[14]定义相轨迹出现凸特性的点为该次摆动的不返回点 NRP (Not Return Point), 系统的 NRP 位于系统状态空间中的实际受扰轨迹上。

需要特别指出的是, 此处 NRP 的定义与通常的定义^[15]不同。通常的 NRP 定义为轨迹再次进入加速过程而失去稳定的点, 即相平面内 $\Delta P = 0$, $d = d_{uep}$, 的点, 2 种定义的区别如图 1 所示。此处以一单机无穷大系统 (SMIB) 作为例子, 以便更好地理解上述概念。虽然图 1 的相轨迹簇依赖于系统的参数, 但图 1 能代表典型的自治 SMIB 相图的特性。

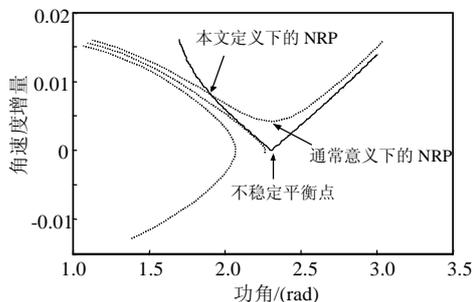


图 1 单机无穷大系统三相短路故障后轨迹
Fig.1 System trajectories of a single machine infinite bus (SMIB) following three-phase faults

3 二阶自治系统基于相图凹凸的暂态稳定性识别理论的证明

3.1 系统平衡点的性质

对一单机无穷大系统, 其动态过程可描述为

$$\begin{aligned} \dot{d} &= w_0 \Delta w \\ \dot{\Delta w} &= [P_m - P_{emi} \sin d - D \Delta w] / T_j \end{aligned} \quad (1)$$

式中 P_m 、 P_{emi} 和 T_j 为常数, 属于二阶非线性常数微分方程组, 通常 $P_{emi} > P_m$; d 为发电机转子角, 单位为 rad。(近似情况下可看成为发电机暂态电抗 x'_d 后的电势 E' 与受端电压 U 间的夹角); $\Delta w = (w - 1)$, Δw 为相对于同步坐标的转子角速度, 发电机内电势 E'_q 以电角速度 w 旋转, 受端无限大功率母线电压 U 以同步角速度 w_0 旋转。

根据非线性微分方程平衡点的定义, 平衡点为方程在 $x' = f(x) = 0$ 处 x 的值, 则有

$$\begin{cases} \Delta w = 0 \\ P_m - P_{emi} \sin d - D \Delta w = 0 \end{cases} \quad (2)$$

即 $(d_s, 0) = (\sin^{-1}(P_m / P_{emi}), 0)$, 平衡点为 $(0, d_s)$ 和 $(0, \pi - d_s)$ 。由 Perron 第一定理可知, 不稳定平衡点是鞍点, 而稳定平衡点的性质根据参数 D 的不同可分为稳定焦点和不稳定焦点^[16]。

3.2 NRP 的数学表达

在系统的相空间中, 定义所有 NRP 的集合构成的一个曲面为不返回边界 (NRPB), 其表达式为

$$-P_{emi} \cos d T_j w_0 \Delta w - D [P_m - P_{emi} \sin d - D w] - [P_m - P_{emi} \sin d - D \Delta w]^2 / \Delta w = 0 \quad (3)$$

根据定义, 系统(1)相轨迹上任意点处的斜率函数为 $(d \Delta w / dt) / (dd / dt) = d \Delta w / dd = k(d, \Delta w) =$

$$[P_m - P_{emi} \sin d - D \Delta w] / (T_j w_0 \Delta w) \quad (4)$$

式(4)是转子角速度相对于转子角的一阶导数。

因此相轨迹上任意点处的斜率相对于功角变化的速率(即角速度相对于功角变化的二阶导数)为

$$dk / dd = k'(d, \Delta w) = \{ [-P_{emi} \cos(d) - D d \Delta w / dd] \cdot T_j w_0 \Delta w - [P_m - P_{emi} \sin d - D \Delta w]^2 / \Delta w \} / (T_j w_0 \Delta w)^2 \quad (5)$$

根据 NRPB 的定义可得出: NRP 实际上是相轨迹上角速度相对于功角变化的二阶导数等于零的点, 因此其数学表达式为

$$k'(d, \Delta w) = 0 \quad (6)$$

整理式(5)即得式(3)。式(3)定义了二维平面内的 1 条曲线, 该曲线确定了系统摇摆的 NRPB, 如图 2,

曲线上的任意点都对应1条相轨迹的NRPB。因式(3)的周期性,系统存在无穷多个稳定平衡点,此处的不返回界面是相对于故障后系统的稳定平衡点的。且不返回界面将该区域相平面划分为凸凹2个区域。由数学中凹凸性的定义可知,当 $k'(d, \Delta w) > 0$ 时,相轨迹相对于稳定平衡点的几何特性是凸的,而当 $k'(d, \Delta w) < 0$ 时,相轨迹的几何特性是凹的。

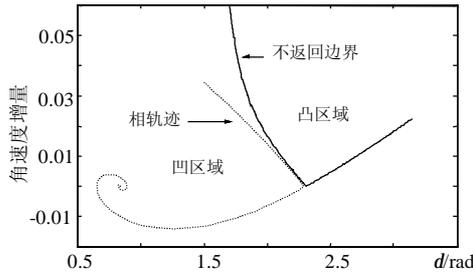


图2 不返回边界与相轨迹关系

Fig. 2 Relationship of NRP boundary and phase portrait

3.3 定理的证明

定理 1: 在单机无穷大系统的相平面内,任何与NRPB相交的、从凹区域穿入凸区域的轨迹,将不会再穿回该凹区域。

证明: 考察式(3)~(6), 做辅助函数如下:

$$l(\Delta w, d) = -P_{emi} \cos d T_j w_0 \Delta w - D[P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w] - [P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w]^2 / \Delta w \quad (7)$$

求函数 $l(w, d)$ 在 $l=0$ 处对 t 的导数为

$$\frac{dl}{dt} \Big|_{l=0} = \left[\frac{\partial l}{\partial d} \cdot \frac{dd}{dt} + \frac{\partial l}{\partial \Delta w} \cdot \frac{d\Delta w}{dt} \right] \Big|_{l=0} \quad (8)$$

式中

$$\frac{\partial l}{\partial d} \cdot \frac{dd}{dt} = -[(-P_{emi} T_j w_0 \Delta w \sin d) - DP_{emi} \cos d + \frac{2(P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w)(-P_{emi} \cos d)\Delta w}{(\Delta w)^2}] w_0 \Delta w$$

$$\frac{\partial l}{\partial \Delta w} \cdot \frac{d\Delta w}{dt} = -\frac{d\Delta w}{dt} \left[(P_{emi} T_j w_0 \cos d) - D^2 + \frac{(P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w)(-D\Delta w)}{(\Delta w)^2} + \frac{[P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w](-D\Delta w) - [P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w]^2}{(\Delta w)^2} \right]$$

再次利用在界面上 $l=0$, 即

$$P_{emi} \cos d w_0 T_j \Delta w = -D[P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w] - [P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w]^2 / \Delta w$$

最终可得

$$\frac{\partial l}{\partial \Delta w} \cdot \frac{d\Delta w}{dt} = -\{2(P_{emi} T_j w_0 \cos d)[P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w] + P_{emi} T_j \cos d D\Delta w_j\} / T$$

$$(\partial l / \partial \Delta w) \cdot (d\Delta w / dt) = -P_{emi} w_0 \cos d [2(P_m - P_{emi} - D\Delta w) + D\Delta w]$$

因此, 式(3)~(8)可简化为

$$\frac{dl}{dt} \Big|_{l=0} = -[(-P_{emi} T_j w_0 \Delta w \sin d) - DP_{emi} \cos d + \frac{2(P_m - P_{emi} \sin d - D\Delta w)(-P_{emi} \cos d)\Delta w}{(\Delta w)^2}] w_0 \Delta w - P_{emi} w_0 \cos d [2(P_m - P_{emi} - D\Delta w) + D\Delta w] = P_{emi} T_j w_0^2 (\Delta w)^2 \sin d \quad (9)$$

针对式(3)~(9), 仅在 Δw 的正半平面进行讨论, 由于 $\sin d \geq 0, \Delta w \geq 0$, 因而可以得出

$$dl / dt \Big|_{l=0} \geq 0 \quad (10)$$

即系统式(1)与不返回界面交点处的轨迹总是使 l 增加的, 从而定理得证。对于 Δw 负半平面, 可以用类似的方法求证。

定理 2: 二阶自治系统的稳定边界不会与不返回边界相交。

证明: 用反正法证明。假定二阶系统的不稳定平衡点的稳定流形与NRPB至少存在有1个交叉点^[17], 在该点的1个领域内, dk/dd 由负变正, 位于NRPB上部的轨线上的点始终存在 $dk/dd > 0$, 稳定流形随着 $t \rightarrow \infty$, 斜率将增大。另外由于定理2, 任何穿入NRPB的轨线都不会再穿出该边界, 从而无法收敛到鞍点, 与鞍点的稳定流形性质矛盾, 从而得证。

图3有助于更好地理解相轨迹穿越NRPB后的性态。虚线为故障后轨线, 实线为NRPB。

根据自治系统稳定边界的性质, 结合本文定理1、2即可证明: 在二阶系统中, 稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点总是凹的, 而不稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点在故障切除后立刻或一小段时间后出现凸的几何特性。

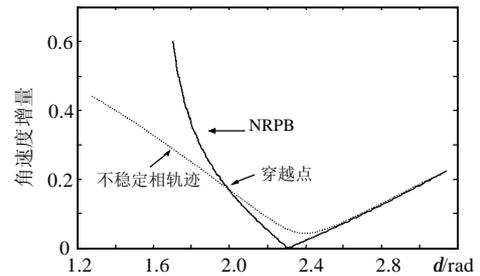


图3 相轨迹穿越NRPB后的情况

Fig. 3 Phase portrait traversing NRPB boundary: convex case

4 凸凹性识别的判据改进

文献[13-14]分别提出了识别相轨迹凸凹性的判据, 即通过 l 的大小快速地识别系统的稳定性; 若

$I > 1$ ，系统则稳定；若由 $I > 1$ 变成 $I < 1$ ，系统则失去稳定。

$$I = \frac{[-\dot{w}(t-\Delta t) \quad w(t-\Delta t)] \begin{bmatrix} d(t-\Delta t) - d^{sep} \\ w(t-\Delta t) \end{bmatrix}}{[-\dot{w}(t-\Delta t) \quad w(t-\Delta t)] \begin{bmatrix} d(t) - d^{sep} \\ w(t-\Delta t) \end{bmatrix}}$$

但实际应用中，由于判据基准值 I_0 为 1，而 I 值又是连续变化的，特别是在穿越 NRPB 点附近， I 偏离 I_0 很小，因而该判据虽然在理论上完全成立，但实际应用时，这种微小的偏离常常会被淹没，但这个微小的偏离恰恰是稳定性判据的关键。另外，该判据要使用到稳定平衡点，这显然有悖于只利用故障后轨迹的初衷。因而本文提出另一种判据，即：使用斜率增量的正、负性作为判据。该判据直接来源于 NRP 的本质定义，更适合用于对离散数据分析，其离散表达式为

$$k(i) = [w(i+2) - w(i)] / [d(i+2) - d(i)]$$

$$\Delta k(i) = k(i+1) - k(i)$$

新的判据为：通过 $\Delta k(i)$ 的正、负快速识别系统的稳定性，若 $\Delta k < 0$ ，系统则稳定；若 $\Delta k > 0$ ，系统则失去稳定。

从表 1 的仿真结果可以看出：新的判据能够更早地识别出相轨迹上出现凸性的点，即 NRP。

表 1 两种指标识别凹凸性的比较

Tab. 1 The comparison of two kinds of methods used to identify convex characteristic

故障切除时间/s	新指标故障识别时间/s	旧指标故障识别时间/s
0.18881	稳定	稳定
0.19506	稳定	稳定
0.20131	0.39662	0.46662
0.20756	0.35797	0.43797
0.21381	0.32436	0.41061

5 计算实例

算例采用文献[18]中的单机无穷大系统，初始条件 $t = 0$ ， $\Delta w_0 = 0$ ， $d_0 = 0.6027 \text{rad}$ ；故障期间 $x_2 = 2.8$ ， $P_{em2} = 0.504$ ；故障切除后 $x_3 = 1.041$ ， $P_{em3} = 1.35$ ，其它参数为 $T_j = 8.18 \text{s}$ ， $P_m = 1$ ，积分步长为 0.01s ， $w_0 = 2\pi f$ 。为了验证的方便，这里采用数值积分的数值结果作为实测数据。

表 2 凹凸性方法与固定阈值方法的比较

Tab. 2 The comparison between the method based on concave or convex of trajectory and the method based on threshold value

故障切除时间/s	故障后凸点出现时刻/s	故障发生到识别出失稳所需总时间/s	固定阈值识别/s ($d=150^\circ$)	2 种识别方法速度上的差异/s
0.19506	无 (稳定)	无 (稳定)	无 (稳定)	无 (稳定)
0.20131	0.19531	0.39662	0.82787	0.43125
0.20756	0.15041	0.35797	0.72547	0.3675
0.21381	0.11055	0.32436	0.66561	0.34125
0.22006	0.10572	0.32578	0.61078	0.29202
0.22631	0.087178	0.31349	0.58849	0.275
0.23256	0.071162	0.30372	0.55372	0.25

图 4 为不同故障切除时间下的相轨迹与不返回边界的关系图。右边的实线为 NRPB，左边的实线为故障持续轨迹，虚线为故障切除后轨迹。从图中可以看出：稳定的故障后轨迹与 NRPB 没有交点；而失步的轨迹将在与边界的交点处呈现出凸的特性；临界故障切除时间下的相轨迹将与该边界相切；故障持续时间越长，故障切除后相轨迹呈现凸性越快。这对失步的识别是有益的，与通常的认识也是一致的。

图 5 为不同故障切除时间下的时域功角输出。图中失稳的曲线与图 5 中的失稳曲线对应。

为了验证本文所提方法的有效性，选用了通常的固定阈值方法作为比较，即阈值定为 150° 。从表 2 可以看出：根据故障的严重程度不同，本文所提方法相对于阈值方法，均能提前识别出失稳 ($0.2 \sim 0.5 \text{ms}$)。当前通常的功角在线预测算法的预测步长大约为 0.4ms 左右^[19-20]，因而本文所提识别方法本身就具有较好的预测作用。另外，阈值值的

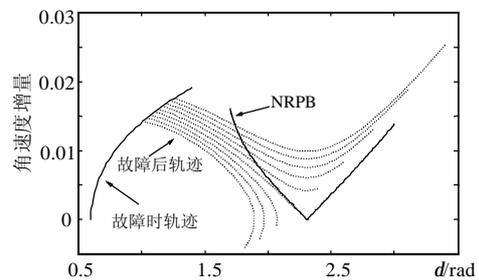


图 4 不同故障切除时间下相轨迹与 NRPB 的关系
Fig. 4 The relationship of NRPB boundary and phase portrait of different fault-clearing

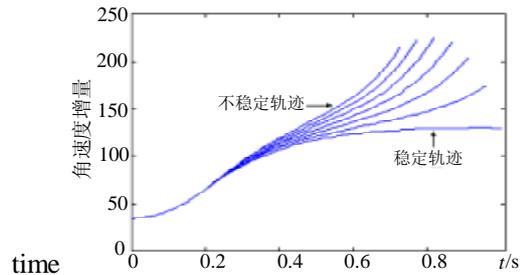


图 5 不同故障切除时间下，功角时域轨迹
Fig. 5 Rotor angle result of different fault-clearing time in time domain

方法存在整定值难以选取的缺点,可能存在误判;而本文所提的方法经过严格的证明是充分的。如果门槛值选用 180° ,其有效性将更加明显。

6 结语

在线电力系统暂态稳定性预测主要依靠功角预测过程和快速稳定识别过程来完成。本文在严格证明了二维系统相图凹凸性暂态稳定性识别理论的基础上,提出了一种电力系统暂态稳定性识别改进方法,仿真算例验证了该方法能够快速识别系统的失步,本身就具有一定的预测作用。

实际上,该思想也可推广到多机系统,初步研究发现:多机系统的不稳定性通常可由系统中最快加速和减速失步机组的局部相平面轨迹的凹凸性表征,其原理与位能脊方法相似,但严格的理论证明和准确的轨迹预测更为复杂,值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] 滕林,刘万顺,贲志皓,等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
Teng Lin, Liu Wangshun, Yun Zhihao, et al. Study on real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
- [2] 蔡国伟,穆刚, K W Chan, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.
Cai Guowei, Mu gang, K W Chan, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [3] 刘峰,新焕海,甘德强,等. 一个基于上届函数的暂态稳定域估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 15-20.
Liu Feng, Xin Huanhai, Gan Deqiang, et al. Transient stability domain estimation using an bounding function[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 15-20.
- [4] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防护能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
Zhang Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6
- [5] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 中国电力出版社, 1996.
- [6] 吴政球,陈辉华,唐外文,等. 以单机等面积稳定判据分析多机系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 48-52.
Wu zhengqiu, Chen huihua, Tang waiwen, et al. Using single machine equal area criterion to analyze multi-machine systems stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 48-52.
- [7] 房大中,张尧,宋文南,等. 修正的暂态能量函数及其在电力系统稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 200-203.
Fang Dazhong, Zhang Yao, Song Wennang, et al. Corrected transient energy function and its application to power system transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 200-203.
- [8] 殷明慧,邹云. 电力系统结构保持模型相关不稳定平衡点方法的判别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 83-89.
Yin Minghui, Zou Yun. The methodology studies for controlling UEP method in network structure preserving power system model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 83-89.
- [9] Ah King, R T F, Rughooputh H C S. Real-time transient stability prediction using neural tree networks[C]. Systems, Man and Cybernetics, 1995. 'Intelligent Systems for the 21st Century', IEEE International Conference on, 1995, 3: 2182-2187.
- [10] Amr G Bahbah, Adly A Girgis. New method for generators' angles and angular velocities prediction for transient stability assessment of multimachine power systems using recurrent artificial neural network[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19(2): 1015-1022.
- [11] 严登俊,鞠平,袁洪. 网络通信模式下电网相量的广域测量与实时传输系统[J]. 电网技术, 2004, 27(4): 15-18.
Yan Dengjun, Ju ping, Yuan hong. Wide area measurement and real time transmission system for phasor data under network communication mode[J]. Power System Technology, 2004. 27(4): 15-18.
- [12] 严登俊,鞠平,吴峰,等. 基于GPS时钟信号的发电机功角实时测量方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 38-68.
Yan Dengjun, Ju ping, Wu Feng, et al. Real time power angle measurement of asynchronous generator based on gps clock signal and tachometer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 38-68.
- [13] Liancheng Wang, Adly A. Girgis. A new method for power system transient instability detection[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(3): 1082-1088.
- [14] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于改进的势能界面判据实时预测电力系统稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 94-99.
Lu Zhilai, Zhang Baohui, Ha Hengxu. Real time fast predict transient stability based on corrected potential surface criterion [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 94-100.
- [15] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1999.
- [16] 马知恩,周义仓. 常微分方程稳定性与稳定性方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [17] Hsiaocong Chiang, Felix Wu, P Varaiya. Foundations of direct methods for power system transient stability analysis[J]. IEEE Transaction on Circuits And Systems, 1987, 34(2): 712-728.
- [18] 刘笙,汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1996.
- [19] 孙建华. 一种电力系统暂态稳定性快速实时预测方法[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 60-66.
Sun Jianhua. A real time fast predict transient stability method of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 60-66.
- [20] 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[J]. 电网技术, 1995, (1): 17-22.
Li guoqing, Sun fujun, Ren qiang. Real time prediction and control method for transient stability of multi-machine power system based on outside observation[J]. Power System Technology, 1995, 18(1): 17-22.

收稿日期: 2005-10-08。

作者简介:

谢欢(1979-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定分析及其控制;

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护、电力市场环境下的安全可靠性和经济性的统一、安全稳定控制和电力线通信等领域的教学、科研工作;

于广亮(1978-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定分析及其控制。

(责任编辑 喻银凤)