

基于功角曲线拟合的快速暂态稳定预估分析

匡文凯¹, 黎为², 吴政球¹, 易奇³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 东安电力公司 湖南 永州 425900;
3. 许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 根据单机等面积稳定判据原理, 把发电机功角曲线展开成自变量为功角的高阶泰勒级数, 采用时域仿真的办法对受扰系统进行短时间的仿真, 根据仿真结果对机组电磁功率与转子相对角曲线进行拟合。用得到的功角曲线预测机组的最大减速面积之差, 从而可以计算出系统的稳定裕度与不稳定裕度。采用的单机等面积技术既具有时域仿真方法的精确性与良好的适应性, 又能适用于大规模电力系统, 可得出基于加速面积与减速面积的能量型稳定裕度。与其它能量函数法相比, 该方法不必进行失稳模式的判别。实例计算表明所提出方法能充分满足工程应用中的可靠性、有效性和计算效率, 具有广泛的工程应用前景。

关键词: 暂态稳定; 预想事故; 稳定裕度预测; 单机等面积判据; 最小二乘法

A fast transient stability predicting method by fitting

KUANG Wen-kai¹, LI Wei², WU Zheng-qiu¹, YI Qi³

(1. Department of Electrical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Dongan Electric Power Co., Yongzhou 425900, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The curve between electric power of generator unit and rotor's angle in relative to center of inertia is expanded by Taylor's series based on single generation equivalent area criteria theory (SGEAC). By using SGEAC and combining with time domain simulation method, the disturbed system is simulated for a very short time period. According to the simulation result, the curve between electric power of generator unit and rotor's angle in relative to center of inertia is fitted. Maximum deceleration area or maximum acceleration area of each unit is obtained according to the fitted curves and then the stability margin and instability margin for the system are obtained. Compared with the time domain simulation, the advantage of the method is that the stability margin based on single machine energy can be obtained for stable system. Compared with such methods as EEAC, it is not necessary to determine the correct two-group mode. Practical system analysis shows that the method is very efficient, and it should have wide engineering applications for on-line stability monitoring.

Key words: transient stability; contingency; stability margin prediction; single machine equal area criterion; recursive least-squares

中图分类号: TM731 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0093-05

0 引言

对高维非线性电力系统的暂态稳定分析, 目前最有效的方法是时域仿真法^[1]。虽然时域仿真方法可以计算出稳定极限(临界切除时间或功率极限), 但需要耗费大量机时, 同时该方法只能根据运动轨迹是否越限来(一般把发电机间功角差大于或等于 180° 作为头阈值)判断系统是否稳定, 对预防控制与紧急控制难以提供有用的信息。基于PEBS的暂态能量函数法能判断系统是否稳定, 但很难给出系统量化稳定裕度^[2]。预想事故筛选排队方法有基于RUEP的能量函数法^[3], 转子角度平方指标法^[4], EEAC及其衍生方法^[5-7]。基于RUEP的能量函数法

需确定特定故障情况下RUEP控制机组, 对于大规模系统而言, 如何寻找正确的RUEP控制机组是一件相当困难的事情。转子角度平方指标法是根据时域仿真结果计算出转子角度的平方, 对于失稳事故而言转子角度的平方与稳定事故仿真得到的转子角度平方将相差很大, 但为了获得准确性高的预想事故排队, 时域仿真到什么时候很难正确把握, 该方法也不能给出稳定裕度的大小。EEAC及其衍生方法需动态确定二群(机)失稳模式。

EEAC理论中的等值机电磁功率曲线中变量功角为两等值机的功角差。系统动态过程中, 正弦曲线的参数会不断发生变化。本文将单一机组的功角曲线表达为惯性中心坐标系下本机转子角度的多项

式函数,而且,系统动态过程中,功角曲线的参数会不断发生变化,这一点与动态 EEAC 或 SIME 的思路是一致的。利用短时间时域仿真得到发电机的电磁功率与转子角度之间的关系,通过曲线拟合预测未来一段时间内功角曲线的走向来预测系统的稳定性。本文所得机组功角曲线用来估计机组最大减速面积。根据稳定裕度大小,对预想事故集进行评价。与已有文献^[5-7]相比较,本文方法不必进行失稳模式的判别。通过对 IEEE 17 机测试系统和实际大系统的分析,证实了本文所提方法的快速性、可靠性和有效性。

1 单机功角曲线多项式拟合

在系统惯性中心 (COI) 坐标系下,机组转子运动方程为:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} = \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{\delta}_i = \delta_i - \delta_0$, $\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{i=g} M_i \delta_i$

$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$, $\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{i=g} M_i \omega_i$,

$M_T = \sum_{i=1}^{i=g} M_i$, $P_{COI} = \sum_{i=1}^{i=g} (P_{mi} - P_{ei})$

定义: $P'_{ei} = P_{ei} + \frac{M_i}{M_T} P_{COI}$ (2)

式中: ω_i 为转子角速度和同步速的偏差, δ_i 为转子角度, $P_{m,i}$ 为机组的机械功率, g 为发电机组总台数。

由电力系统分析可知机组 i 的等效电磁功率 P'_{ei} 对 $\tilde{\delta}_i$ 是连续可导的, P'_{ei} 对 $\tilde{\delta}_i$ 的偏导数可以表示为:

$$\frac{dP'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i} = \frac{dP_{ei}}{d\tilde{\delta}_i} + \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^g \left(-\frac{dP_{ej}}{d\tilde{\delta}_i} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dP_{ei}}{d\tilde{\delta}_i} = \frac{dP_{ei}}{dt} \times \frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \quad (4)$$

其中: $\frac{dP_{ei}}{dt}$ 、 $\frac{d\tilde{\delta}_i}{dt}$ 可按文献[8]求得。令 $\frac{dP_{ei}}{dt} = P$,

则 P_{ei} 对 $\tilde{\delta}_i$ 的 m 阶导数为:

$$\frac{d^m P_{ei}}{d\tilde{\delta}_i^m} = \sum_{k=1}^m C_{m-1}^{k-1} \times \frac{d^{(m-k)} P}{d^{(m-k)} \tilde{\delta}_i} \times \left(\frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \right)^{(k)} \quad (5)$$

由微积分有:

$$1 = \frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} \times \frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \quad (6)$$

式 (6) 中 $\tilde{\delta}_i$ 的 m 阶导数可表示为:

$$\left(\frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \right)^{(m)} = -\frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \times \sum_{k=0}^{m-1} C_m^k \times \left(\frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} \right)^{(m-k)} \times \left(\frac{dt}{d\tilde{\delta}_i} \right)^k \quad (7)$$

通过式 (3) ~ (7) 可以求得 P_{ei} 对 $\tilde{\delta}_i$ 的高阶导数。大量算例表明: 机组在达到最大角度 $\tilde{\delta}_i^{\max}$ 之前 P'_{ei} 与 $\tilde{\delta}_i$ 之间是一条连续可微曲线。本文将利用时域仿真得到的连续曲线 $P-\tilde{\delta}$ 及拟合得到的高阶泰勒级数来预测从当前功角到不稳定平衡点之间的 $P-\tilde{\delta}$ 曲线。将 $P-\tilde{\delta}$ 曲线在机组功角点 $\tilde{\delta}_i^0$ 附近展开成泰勒级数后可有:

$$P'_{ei} = P'_{ei} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0} + \frac{dP'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0} (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^0) + \frac{1}{2!} \times \frac{d^2 P'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i^2} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0} (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^0)^2 + \dots + \quad (8)$$

$$\frac{1}{k!} \times \frac{d^k P'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i^k} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0} (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^0)^k$$

令 $a_{0,i} = P'_{ei} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0}$, $a_{1,i} = \frac{dP'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0}$,

$a_{k,i} = \frac{1}{k!} \times \frac{d^k P'_{ei}}{d\tilde{\delta}_i^k} \Big|_{\tilde{\delta}_i=\tilde{\delta}_i^0}$, 则式 (8) 可以写成:

$$P'_{ei} = f(\tilde{\delta}_i) = a_{0,i} + \sum_{k=1}^l a_{k,i} (\tilde{\delta}_i)^k \quad (9)$$

由数学分析可知,在展开点 $\tilde{\delta}_i^0$ 附近的一个邻域内,泰勒级数能较好地吻合原曲线。由功角点 $\tilde{\delta}_i^0$ 之前的时刻点上的数据拟合得到的功角曲线应该可以很好地预测当前功角点 $\tilde{\delta}_i^0$ 到不稳定平衡点之间的曲线。

2 基于 SGEAC 的时域仿真稳定裕度预测

2.1 时域仿真与功角曲线拟合

利用故障切除后仿真得到的每一个时刻点上每一台发电机的 $(\tilde{\delta}_i, P_{ei})$ 数据,用最小二乘法^[9]可拟合出功角曲线。拟合过程及拟合度的判别按如下步骤进行。

1) 仿真到故障切除后 0.05 s 即开始拟合。首先用二次多项式拟合,用误差平方和 SSE (Sum of

Squared Error) 检查拟合精度。

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (10)$$

式中: y_i 为样本数值, \hat{y}_i 为拟合曲线计算数值, n 为样本数据个数。如果样本数据中包含了越过最大(小)功角点的回摆数据, 样本数据中应剔除这些回摆数据。根据经验, 当 $SSE \leq 0.001$ (随样本数据的个数变化而变化) 时可认为拟合度很好, 可利用拟合的曲线进行未来时刻的功角曲线预测, 进而预测系统的稳定性; 否则分别用 3、4 次多项式进行拟合;

2) 如果有些机组的拟合精度不够, 继续仿真 0.05 s, 重复步骤 1);

3) 仿真停止, 当所有机组的拟合精度 $SSE \leq 0.001$ 时, 终止时域仿真。

2.2 不稳定平衡点的确定

通过解方程 (11) 可求得机组 i 的不稳定平衡点。

$$f_p(\tilde{\delta}_i) = P_{m,i} \quad (11)$$

式中: $f_p(\tilde{\delta}_i)$ 为故障切除后拟合的 $P-\tilde{\delta}$ 曲线。

应注意的是: 对于严重不稳定的机组, 用拟合得到的功角曲线解方程 (11) 有可能得不到不稳定平衡点。

2.3 系统稳定裕度

文献[10]在对失稳机组的物理观测与数学分析的基础上得出了暂态稳定的单机等面积稳定判据。在系统故障时可得出机组 i 的单机加速面积为:

$$S_{aci} = \int_{\tilde{\delta}_i^0}^{\tilde{\delta}_i^{cl}} (P_{m,i} - f_f(\tilde{\delta}_i)) d\tilde{\delta}_i = \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^{cl2} \quad (12)$$

式中: $\tilde{\delta}_i^0$ 、 $\tilde{\delta}_i^{cl}$ 分别为故障起始时刻及故障切除时刻机组 i 相对惯性中心坐标下的角度; $\tilde{\omega}_i^{cl}$ 为故障切除时刻发电机相对惯性中心的转速; $f_f(\tilde{\delta}_i)$ 是故障期间机组 $P_c-\tilde{\delta}_i$ 曲线。

故障切除后, 可定义如下机组最大减速面积:

$$S_{dei}^{max} = - \int_{\tilde{\delta}_i^{cl}}^{\tilde{\delta}_i^u} (P_{m,i} - f_p(\tilde{\delta}_i)) d\tilde{\delta}_i \quad (13)$$

式中: $\tilde{\delta}_i^u$ 为机组 i 相对惯性中心坐标下的不稳定平衡点角度; $\tilde{\delta}_i^{cl}$ 为故障切除时机组 i 相对惯性中心坐标下的角度; $f_p(\tilde{\delta}_i)$ 是故障切除后机组功角曲线。

对稳定机组 i , 可定义其稳定裕度为:

$$\eta_{si} = (S_{dei}^{max} - S_{aci}) / S_{aci} \quad (14)$$

若 $\eta_{si} < 0$, 则机组 i 第一摇摆失稳, 此时系统

将失去稳定; 若 $\eta_{si} > 0$, 则机组 i 第一摇摆稳定, 若系统中所有机组第一摇摆稳定, 则系统第一摇摆稳定。系统稳定裕度为:

$$\eta_s = \min \eta_{si} \quad (15)$$

3 实例分析

本文测试算例采用 IEEE17 机标准测试系统, 按照文献[12]中的数据, 发电机采用 E'_q 恒定模型, 负荷用恒定阻抗模型, 仿真步长为 0.002 s。

3.1 功角曲线拟合的准确性

当系统故障为 0 s #75 母线处三相短路, 0.15 s 通过断开 #75 母线至 #9 母线之间的线路来切除故障时 (故障 A), #125 号节点机组的 $P-\tilde{\delta}$ 预测曲线与仿真曲线如图 1 所示。当系统故障为 0 s #75 母线处三相短路, 0.356 s 通过断开 #75 母线至 #9 母线之间的线路来切除故障时 (故障 B), #130 号节点机组的 $P-\tilde{\delta}$ 预测曲线与仿真曲线如图 2 所示。

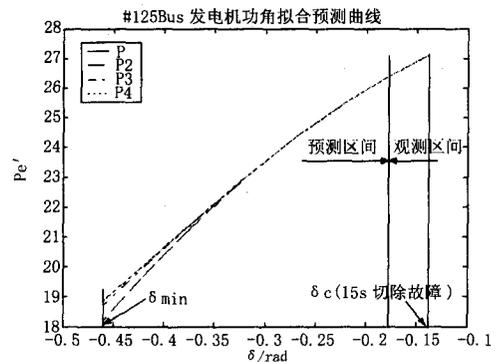


图 1 故障 A 时 #125 号节点机组的 $P-\tilde{\delta}$ 预测曲线与仿真曲线

Fig.1 $P-\tilde{\delta}$ curves for the unit at #125BUS for fault A

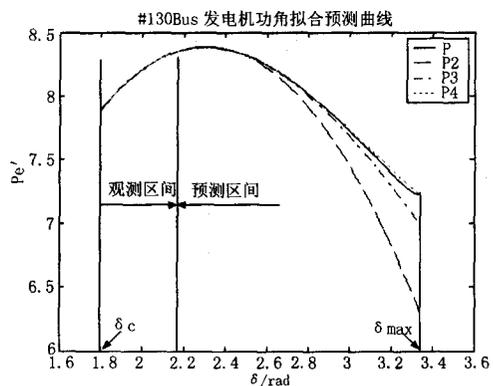


图 2 故障 B 时 #130 号节点机组的 $P-\tilde{\delta}$ 预测曲线与仿真曲线

Fig.2 $P-\tilde{\delta}$ curves for the unit at #130BUS for fault B

图中曲线 P 为延长仿真得到的 $P-\tilde{\delta}$ 曲线, P2、P3、P4 分别为采用 2 次、3 次、4 次多项式拟合得到的 $P-\tilde{\delta}$ 曲线。拟合用的样本数据为观测区数据。从图中可以看出 4 次多项式拟合度最好, 通过故障切除后短时仿真 (观测区样本数据) 能准确预测未来时刻的功角曲线。

根据短时间仿真拟合得到的 $P-\tilde{\delta}$ 曲线, 解方程 (16) 可预测稳定机组的最大功角 $\tilde{\delta}_i^{\max}$, 解方程 (11) 可预测不稳定机组的不稳定平衡点功角 $\tilde{\delta}_i^u$ 。

$$\int_{\tilde{\delta}_i^u}^{\tilde{\delta}_i^{\max}} (f_p(\tilde{\delta}_i) - P_{mi}) d\tilde{\delta}_i = \frac{1}{2} M_i \omega_i^{cl,2} \quad (16)$$

通过延长仿真时间, 可以得到稳定机组的最大功角及不稳定机组的不稳定平衡点。最大功角与不稳定平衡点功角的预测结果与仿真结果如表 1 所示。由表中数据可知功角拟合具有较高的精度。

3.2 不同故障下系统稳定判别

表 1 列出了 10 个故障的稳定分析结果。对比可知本文方法稳定分析结果正确。由于稳定判别所依赖的 $P-\tilde{\delta}$ 功角曲线具有一定的预测功能, 本文方法所需的时域仿真时间 (ST) 也相对较短。

表 1 系统稳定分析结果

Tab.1 System stability analysis results

故障线路	T/s	ST/s	稳定裕度	F1	F2
75*-9	0.346	0.22	15.936 9 (121)	S	S
126*-16	0.326	0.22	13.706 3 (126)	S	S
127*-17	0.374	0.22	13.204 3 (27)	S	S
40*-22	0.242	0.17	84.525 2 (126)	S	S
26*-76	1.244	0.27	-113.887 (6)	U	U
109*-42	0.262	0.20	-28.180 5 (99)	U	U
87*-49	0.468	0.22	-40.527 (130)	U	U
53*-71	0.354	0.22	-13.877 (130)	U	U
162*-55	0.336	0.22	22.096 (121)	S	S
157*-156	0.598	0.22	-43.98 (73)	U	U

表 1 中, 故障切除时间均为 0.12 s, 故障线路节点号带*的表示为短路点, 切除故障方式为切断故障线路, 稳定裕度后面的括号中的数字表示稳定裕度最小的机组, T 为最大角度或不稳定平衡点角度时间, ST 为采用本文方法判断系统稳定所需时域仿真时间 (不是计算机所需时间), F1 为详细时域仿真判稳方法, F2 为本文判稳方法, S 为稳定, U 为不稳定。

3.3 临界故障切除时间比较

为与文献[12]方法进行比较, 本文采用与文献[12]相同的故障: 在#75 母线处三相短路, 通过断开#75 母线至#9 母线之间的线路来切除故障。这个故障产生了复杂的扰动, 靠近故障点的 7 台发电机

发生剧烈波动。表 2 给出了不同故障切除时间, 本文方法与 ETMSP 和 PSS/E 方法的结果比较。

表 2 17 机系统故障切除时间与稳定判定

Tab.2 Clearing time and stability result in 17 generator system

故障切除时间	稳定裕度	本文方法判稳结果	ETMSP 判稳结果	PSS/E 判稳结果
0.352	1.077	稳定	稳定	稳定
0.354	1.051	稳定	不稳定	稳定
0.356	-1.352	不稳定	不稳定	不稳定

注: ETMSP、PSS/E 稳定判定结果是根据文献[12]提供的数据。故障切除时间为 0.356 s 时, 一摆稳定裕度为 0.432, 表明处于稳定与不稳定的临界处, 延长仿真时间, 计算出其第二摆稳定裕度的稳定裕度为-1.352。

从表 2 中可以看出, 本文方法系统稳定判定结果与 PSS/E 的结果是相吻合的。

图 3 与图 4 分别给出了在 0.354 s、0.356 s 切除故障系统部分发电机角度的变化曲线。

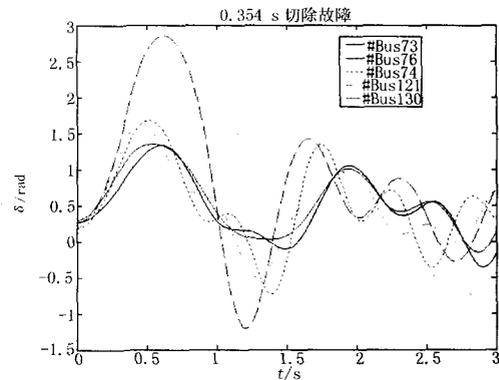


图 3 0.354 s 切除故障时部分发电机摇摆曲线

Fig.3 Generator swing curve when fault cleared at 0.354 seconds

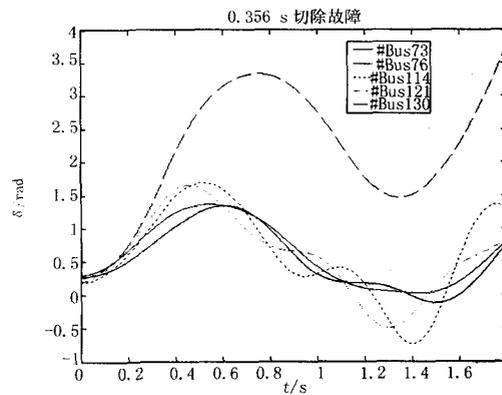


图 4 0.356 s 切除故障系统部分发电机摇摆曲线

Fig.4 Generator swing curve when fault cleared at 0.356 seconds

4 结论

利用短时间时域仿真结果,结合最小二乘法拟合出了单机多项式功角 $P-\delta$ 曲线。基于 SGEAC 提出了系统稳定裕度预测方法与时域仿真终止准则。大量分析表明所提算法实用可行正确。所提方法具有较好的超前稳定判别能力,可有效减少时域仿真时间,预测方法精度高、计算速度快。

延长仿真时间,本文方法能较好地判断多摆失稳的情况。

基于广域测量(WAMS)的在线稳定分析与控制系统中,可能只能得到系统中骨干电厂机组的测量。采用基于参考机的单机等面积使得在线稳定分析成为可能,进一步研究结果将另文发表。

参考文献

- [1] 倪以信. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
NI Yi-xin. The Theory and Analysis on Dynamic Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 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.
Lü Zhi-lai, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu. Real Time Fast Predict Transient Stability Based Corrected Potential Surface Criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 94-99.
- [3] 江宁强, 宋文忠, 戴先中. 基于稳定域边界的主导不稳定平衡点(BCU)法前提条件的验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 24(6): 48-52.
JIANG Ning-qiang, SONG Wen-zhong, DAI Xian-zhong. A Restriction on the Power System by Theoretical Requisitions of the BCU Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 24(6): 48-52.
- [4] Rovngak S M. Integral Square Generator Angle Index for Stability Assessment[A]. In: Proc. IEEE PES Winter Meeting[C]. Columbus: 2001.1052-1054.
- [5] Bettoil A L, Wehenkel L, Pavella M. Transient Stability Constrained Maximum Allowable Transfer[J]. IEEE Tran on Power Systems, 1999, 14(2): 654-659
- [6] Ernst D, Vega D R, Parvella M, et al. A Unified Approach to Transient Stability Contingency Filtering, Ranking and Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 435-443.
- [7] 薛禹胜. 电力市场和电网互联对稳定分析技术的挑战, 面向 21 世纪电力科学技术讲座[M].北京: 中国电力出版社, 2001.35-69.
XUE Yu-sheng. Challenging of Power System Deregulation and Interconnection to Power System Stability Analysis, Tutorial for 21century Power System Technology[M].Beijing: China Electric Power Press, 2001.35-69.
- [8] 于继来, 郭志忠, 柳焯. 基于能量型高阶 Taylor 级数展开技术的直接法[J].电网技术, 1995, 19(2): 18-24.
YU Ji-lai, GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo. Direct Method with High Order Taylor Series Expansions of Energy Function[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 18-24.
- [9] 齐治昌. 数值分析及其应用[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1987.
QI Zhi-chang. Numerical Analysis and Its Application[M]. Beijing: National Defense University Press, 1987.
- [10] 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 Zheng-qiu, CHEN Hui-hua, TANG Wai-wen, et al. Using Single Machine Equal Area Criterion to Analyze Multi-machine Systems Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 48-52.
- [11] Michel A N, Fouad A A, Vittal V, Power System Transient Stability using individual Machine Energy Function[J].IEEE Trans on Circuit and Systems, 1983, 3(5): 266-276.
- [12] Vittal V. Transient Stability Test Systems For Direct Stability Methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 37-43.

收稿日期: 2009-02-19; 修回日期: 2009-03-27

作者简介:

匡文凯(1973-), 男, 博士研究生。研究方向为电力系统稳定性分析与控制; E-mail: yiqi2801@163.com

黎为(1977-), 男, 学士, 长期从事电力系统的生产与调度;

吴政球(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 电力市场。