

# 电力系统在线暂态稳定分析方法

孙闻, 房大中, 薛振宇

(电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

## A Method for On-Line Analysis of Power System Transient Stability

SUN Wen, FANG Da-zhong, XUE Zhen-yu

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control (Tianjin University),  
Ministry of Education, Nankai District, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** A new method for on-line analysis of power systems transient stability is presented. According to the result of time-domain simulation of fault, a two-dimension first-order differential equation system is established which describes the motion of phase point on unidimensional coordinate axis, so it can be used to observe the angle stability of power system. On this basis, an angle stability criterion is proposed by which the angle stability of power system can be conveniently judged. The proposed method can simplify the process of transient stability analysis effectively, and the misjudgment due to inappropriate selection of the threshold of angle difference can be avoided. In this paper the energy function that is constructed according to the motion of phase point is studied, and by use of the post-fault minimum kinetic energy the stability index describing the severity of fault is defined. The effectiveness practicability of the proposed method is verified by case study of North China power grid in 2007.

**KEY WORDS:** transient stability; power system angle radius; system of differential equations; energy function; stability index

**摘要:** 提出了一种电力系统在线暂态稳定分析方法。结合故障时域仿真, 建立了一个 2 维 1 阶微分方程组。该微分方程组描述了相点在一维坐标轴上的运动, 可用于观察电力系统的功角稳定性。在此基础上提出的功角稳定判据可以方便地判断电力系统的功角稳定性。该方法有效地简化了暂态稳定分析过程, 且避免了因功角差阈值选取不当造成误判的问题。文中还研究了针对相点运动构造的能量函数, 利用故障后的最小动能定义了描述故障严重程度的稳定指标。2007

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217904); 国家自然科学基金资助项目(50777046)。

Project Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217904); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777046).

年华北电网的算例说明了上述方法的有效性。

**关键词:** 暂态稳定; 电力系统角半径; 微分方程组; 能量函数; 稳定指标

## 0 引言

研究可靠快速的暂态稳定分析方法是发展电力系统在线安全分析系统的重要环节<sup>[1-3]</sup>。时域仿真法<sup>[4]</sup>可用于研究复杂数学模型表示的电力系统, 分析结果准确、可靠, 得到了广泛的实际应用<sup>[5]</sup>, 但时域仿真法不能定量描述系统的暂态稳定度。直接法<sup>[6-7]</sup>可定量分析系统的一摆稳定性, 但其模型适应性较差, 因此没有得到推广应用。

近年来, 结合仿真计算的混合法逐渐成为电力系统在线暂态稳定分析方法的主流<sup>[8-14]</sup>。文献[8-11]提出了结合能量函数(transient energy function, TEF)直接法理论的混合法; 文献[12]研究了基于单机等值理论或扩展等面积方法的混合法; 文献[13-14]提出了修正的能量函数混合法。虽然修正能量函数能克服 TEF 混合法中的故障裕度曲线奇异非线性问题, 但稳定裕度计算依赖于鉴别故障的临界机群。稳定裕度计算中需要首先鉴别临界机群是混合法的普遍特点。依赖临界机群鉴别的暂态稳定分析方法存在如下问题: 稳定故障临界机群的在线鉴别尚未得到很好的解决; 同一地点故障, 故障切除时间不同或系统运行参数的变化都可能造成失稳领先发电机群的变化。

为克服上述不足, 本文提出以电力系统惯性中心为参考, 将复杂的多机系统摇摆过程通过非线性变换映射为相点在 1 维坐标轴上的简单运动。该运动由 2 维 1 阶微分方程描述, 通过对相点的运动特征分析可以方便地判断系统的功角稳定性。在此基

基础上, 本文研究相点运动的能量函数并定义描述故障严重程度指标, 并结合仿真计算对严重故障进行定量分析。

## 1 2 维 1 阶微分方程组

### 1.1 数学模型

含  $n$  台发电机的电力系统动态过程一般由 1 阶微分代数方程组描述<sup>[15]</sup>。电力系统相对于系统惯性中心(center of inertia, COI)的发电机转子运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i}(P_{mi} - P_{ei}) - \frac{1}{M_T}P_{COI}, & i=1,2,\dots,n \\ \dot{\theta}_i = \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $M_i$  为第  $i$  台发电机的惯性时间常数,  $\theta_i = \delta_i - \delta_{COI}$  和  $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_{COI}$  分别为第  $i$  台发电机的转子相对于 COI 的角度和角速度;  $P_{mi}$  和  $P_{ei}$  表示第  $i$  台发电机输入的机械功率和输出的电磁功率;

$\delta_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i$  和  $\omega_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i$  为系统惯性中心的角度和角速度, 其中  $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$ ,  $P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei})$ 。

定义系统角半径为

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2} \quad (2)$$

在数学上, 系统角半径是某时刻所有发电机功角  $\theta_i$  的欧几里得范数, 可用于描述发电机功角摆开程度。求  $R$  对时间的 1 阶导数和 2 阶导数可得  $R$  随时间变化的速度和加速度为

$$\begin{cases} v \equiv \dot{R} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i \tilde{\omega}_i)}{R} \\ a \equiv \ddot{R} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{\omega}_i^2 + \theta_i \dot{\tilde{\omega}}_i) - v^2}{R} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)是以  $R$  和  $v$  为状态变量的 2 维 1 阶微分方程组。

### 1.2 物理解释

发电机相对系统惯性中心的功角构成一个以惯性中心为坐标原点的  $n$  维  $\theta$ -角度空间。电力系统动态中, 全系统状态轨迹可映射为各发电机功角  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  对应的相点在该  $n$  维空间中的运动轨迹。

如图 1 所示, 令  $T_r$  表示系统动态中相点在  $n$  维  $\theta$ -角度空间中的运动轨迹, 点 A 表示  $t$  时刻相点在  $T_r$  上的位置。由式(2)可知, 系统角半径  $R$  相当

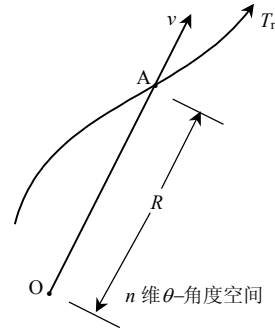


图 1 相点运动轨迹和角半径

Fig. 1 Trajectory of phase point and angle radius

于  $n$  维空间中坐标原点  $O$  至相点  $A$  的距离。以下称射线  $OA$  为  $OA$  坐标轴。需要注意的是, 电力系统动态中  $OA$  坐标轴的方向随点  $A$  的运动而变化。式(3)定义的  $v$  和  $a$  则分别表示相点  $A$  在  $OA$  坐标轴上运动的速度和加速度。因此式(3)描述的是相点在  $OA$  坐标轴上的运动。

## 2 功角稳定判据

电力系统暂态稳定分析的主要目的之一是检查系统在遭受大扰动后, 各发电机组之间能否保持同步运行。传统暂态稳定判据通常采用发电机功角差小于某一指定的阈值, 但阈值的选定没有公认标准, 靠经验指定。结合 2 维 1 阶微分方程(3), 本文提出一种通过观察相点在  $OA$  坐标轴上的运动, 来判定电力系统稳定性的方法。由式(2)可知, 系统遭受大扰动后, 若有 1 台或多台发电机相对系统惯性中心失去同步, 则  $R$  将趋于无穷; 反之, 若系统是暂态稳定的, 则  $R$  将在一定范围内变化。因此研究相点在  $OA$  坐标轴上的运动行为, 即可判断系统在大扰动后能否保持功角稳定运行。

对照图 1 易知, 相点  $OA$  坐标轴上的运动只存在表 1 所列的 4 种状态。其中  $v > 0$  和  $v < 0$  的运动分别称为正向运动和反向运动。

由式(2)可知, 若系统角半径  $R$  随时间的变化趋于无穷, 则至少有 1 台发电机相对于惯性中心失去同步, 电力系统失去功角稳定, 结合表 1 可得到电力系统功角稳定性的判据如下。

**定理 1** 对故障后系统, 若在某一次正向减速

表 1 相点 A 在 OA 坐标轴上运动的状态及特征

运动状态	特征
正向减速	$v > 0, a < 0$
反向加速	$v < 0, a < 0$
反向减速	$v < 0, a > 0$
正向加速	$v > 0, a > 0$

过程后, 相点 A 在 OA 坐标轴上的运动速度  $v$  恒为正值, 则电力系统在这一次摇摆后失去功角稳定。

证明: 根据李雅普诺夫稳定性理论<sup>[16]</sup>, 对系统  $\dot{x} = f(x)$ , 初始状态为  $x_0$ , 若有  $\|x\| \rightarrow \infty \Big|_{t \rightarrow \infty}$ , 则系统是不稳定的。

若在某一次正向减速过程后, 相点 A 在 OA 坐标轴上的运动速度  $v$  恒为正值, 由  $v = dR/dt$  可推论  $R(t) \rightarrow \infty \Big|_{t \rightarrow \infty}$ , 即  $\|\theta\| \rightarrow \infty \Big|_{t \rightarrow \infty}$ 。由  $\theta$  是式(1)的状态变量可知, 此时电力系统将失去功角稳定。

若定理 1 条件满足, 说明相点在某一时刻后持续远离惯性中心运动, 最后冲出稳定区域。通过对不同规模的电力系统分析表明, 当相点在某一次正向减速后转为正向加速, 此后系统将失去稳定; 若在研究时间内未出现上述现象, 则系统稳定。基于这一特点, 当相点在 OA 坐标轴上的运动由正向减速转为正向加速时, 即认为电力系统失去功角稳定。

通过时域仿真(或在线 PMU 实测)获得发电机转子角度、角速度和角加速度, 利用上述判据可判定系统的功角稳定性。结合 2007 年华北某电网的故障仿真具体说明如何应用上述方法判断系统的稳定性。该电网涵盖了我国山西、内蒙、京津唐电网和河北南网, 包括 290 台发电机。算例应用的大扰动为 500kV 线路“1I 布日 51-1I 树林 51”的“1I 布日 51”母线侧 0 s 发生三相短路, 故障后切除该线路。图 2 为发生故障后 0.14 s 切除故障线路变量  $R$ 、 $v$  和  $a$  随时间的变化曲线, 由于相点 A 在故障后的每一次正向减速过程后都转为反向加速运动, 4 种运动状态交替出现, 因此系统是功角稳定的。图 3 为发生故障后 0.16 s 切除故障线路, 变量  $R$ 、

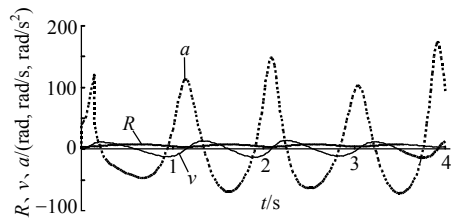


图 2 0.14 s 切除故障下的  $R$ 、 $v$  和  $a$

Fig. 2  $R$ 、 $v$  and  $a$  when the fault cleared in 0.14 s

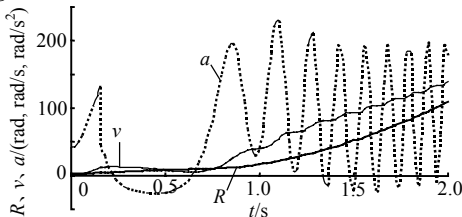


图 3 0.16 s 切除故障下的  $R$ 、 $v$  和  $a$

Fig. 3  $R$ 、 $v$  and  $a$  when the fault cleared in 0.16 s

$v$  和  $a$  随时间的变化曲线, 由于相点 A 在故障后的第一次正向减速过程后转为正向加速, 则判定系统是功角不稳定的。

### 3 电力系统暂态稳定故障扫描

#### 3.1 暂态稳定指标

时域仿真法的主要缺点是不能对故障进行定量分析, 本节将介绍描述相点在 OA 坐标轴上运动的能量函数法, 并在此基础上提出一种反映故障严重程度指标。

由式(3)可得

$$v dv = a dR \quad (4)$$

对式(4)两端沿故障切除时刻  $t_{cl} \sim t$  进行积分得

$$\frac{1}{2} v^2(t) + \int_{R(t_{cl})}^{R(t)} -a dR = \frac{1}{2} v^2(t_{cl}) \quad (5)$$

$V_{KE} = \frac{1}{2} v^2(t)$  可定义为相点 A 在 OA 坐标轴上

运动的动能,  $V_{PE} = \int_{R(t_{cl})}^{R(t)} -a dR$  为故障切除后的势能增量, 因此式(5)描述的是故障后相点在 OA 坐标轴上运动中能量转换的过程, 由于  $\frac{1}{2} v^2(t_{cl})$  是常数, 说明故障后相点在 OA 坐标轴上的运动是能量守恒的。

图 4 是不稳定故障(故障条件与图 3 相同)的能量转换过程。对不稳定故障, 相点总要经过一个正向减速的过程后通过其动能最小点( $V_{KE,min}$ ), 该点对应相点从正向减速转为正向加速的时刻, 此后系统角半径  $R$  将呈单调递增趋势, 电力系统失去稳定。由能量守恒定律可知, 动能最小点对应势能增量最大值, 因此上述过程相当于故障后相点 A 穿越系统稳定的势能边界。

基于上述分析, 有危害故障的稳定指标可定义为

$$I = \frac{V_{KE,min}}{V_{KE,cl}} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $V_{KE,cl}$  是相点在故障切除时刻的动能。该稳定指标表示故障后未能被系统完全吸收的动能比例, 其值越大, 故障越严重。该稳定指标的有效性在对不同规模电力系统的大量分析中得到了充分验证。

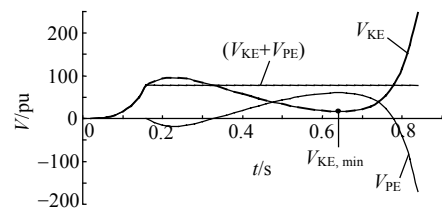


图 4 不稳定故障能量转换示意图

Fig. 4 Scheme of energy conversion for the unstable case

### 3.2 故障扫描算法

电力系统在线安全稳定分析的一项重要内容是故障扫描。令  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  表示给定的严重故障集;  $t_{cl,k}$  表示系统保护装置切除故障  $c_k$  的时间,  $\Delta t$  表示一微小的时间增量(如 0.01~0.02 s)。根据临界切除时间将故障分为 3 类:  $T_k < t_{cl,k}$  的故障称为有危害故障, 该类故障发生后将导致某些发电机失去同步, 进而造成严重后果;  $t_{cl,k} \leq T_k \leq t_{cl,k} + \Delta t$  的故障称作有潜在危害故障, 该类故障处于稳定和失稳的边缘, 系统运行参数的变化有可能导致其变为有危害故障, 因此也需要予以充分关注;  $T_k > t_{cl,k} + \Delta t$  是无危害故障, 有足够的裕度, 予以滤除。本文将有危害故障和有潜在危害故障合称为严重故障。

故障扫描是对预想故障集进行暂态稳定性分析和分类, 滤除无危害故障, 分析严重故障的稳定指标, 并按稳定度做故障排序。通过故障扫描, 运行人员可以及时了解系统的运行状态, 是否存在暂态稳定的安全风险, 同时可为制定预防控制方案提供依据。暂态稳定故障扫描的流程如图 5 所示。

算法分析及说明:

1) 故障仿真在指定的仿真窗口中只记录变量  $R$ 、 $v$  和  $a$  随时间  $t$  的变化曲线。新型稳定判据无需指定功角阈值。

2) 滤除无危害故障, 对严重故障计算稳定指标进行二次仿真, 并对其进行分类。

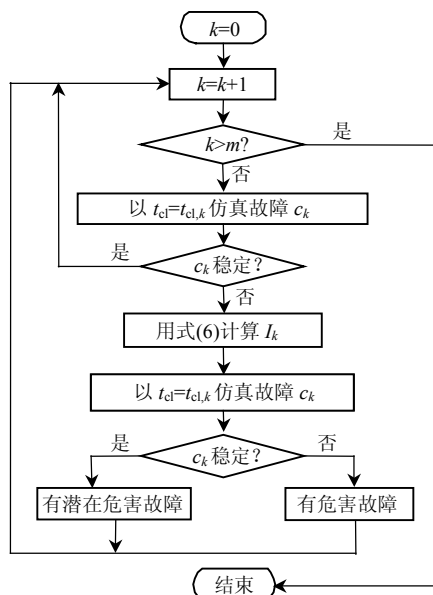


图 5 电力系统暂态稳定故障扫描流程  
Fig. 5 Flow chart of fault scan of power system

3) 在系统运行方式变化不大的情况下, 下次的故障扫描只需针对严重故障进行。

### 4 算例分析

本文提出的电力系统功角稳定判据和故障扫描方法已成功应用于天津电网在线安全分析系统。本节以 2007 年华北电网为例, 介绍上述方法在实际电网中的应用。

仿真使用 BPA 暂态稳定程序, 仿真时间为 4s, 发电机及励磁控制器采用电网要求的各种复杂模型, 对系统内所有 500kV 线路(共 277 条)进行了首末端三相短路分析。为突出暂态稳定问题, 算例中假设  $t_{cl}=0.16s$ ,  $\Delta t=0.02s$ 。表 2 为测试电网中严重故障的分析结果。表中第 1 列表示故障线路, 例如“II 布日 51-II 树林 51”表示短路故障发生在“II 布日 51”母线侧, 故障后切除该线路。第 4 列是采用重复仿真法得到的临界切除时间, 根据稳定指标得到的故障排序与按故障临界切除时间排序的结果一致, 说明本文提出的稳定指标能够很好地反映有危害故障的严重程度。

表 2 严重故障稳定指标及临界切除时间比较

Tab. 2 Comparison of stability index and critical fault clearing times of the severe contingencies

故障线路	故障分类	稳定指标/%	$T_{CCT}/s$
II 布日 51-II 树林 51	有危害故障	81.03	0.147 2
II 布日 K1-II 布日 51	有危害故障	80.65	0.147 8
II 树林 K1-II 树林 51	有危害故障	33.25	0.157 4
II 树林 51-II 永圣 51	有危害故障	33.11	0.158 1
II 达四 51-II 树林 51	有危害故障	27.55	0.159 7
1M 托电 K1-1M 托电 51	有潜在危害故障	20.95	0.171 6

表 3 是本文提出的稳定判据与传统的功角稳定判据分析结果的对比, 故障切除时间设为 0.16s。表中列出了采用本文提出的方法以及所有发电机转子相对于惯性中心的角度小于  $\pi$  和  $2\pi$  作为暂态稳定判据时的分析结果。表中第 2~5 行是根据不同稳定判据判定故障失稳的时刻, 可见本文所提出的稳定判据能够更快地确定系统失稳, 且避免了功角阈值选取的问题。随着广域测量技术的逐渐成熟, 对电力系统进行实时监测成为可能, 利用本文提出的稳定判据, 结合实时测量的发电机功角信息, 可以更快更准确地对系统失稳做出判断并预警, 为采取紧急控制措施、降低危害赢得了宝贵时间。

表3 稳定判据分析结果

Tab. 3 Analysis results of different stability criterion

故障线路	故障切除时间/s		
	本文判据	$\theta_{\max} < \pi$ 时	$\theta_{\max} < 2\pi$ 时
II 布日 51-II 树林 51	0.66	0.66	0.92
II 布日 K1-II 布日 51	0.66	0.66	0.92
II 树林 K1-II 树林 51	1.06	1.20	1.42
II 树林 51-II 永圣 51	1.06	1.20	1.42
II 达四 51-II 树林 51	1.12	1.56	1.72
1M 托电 K1-1M 托电 51	稳定	稳定	稳定

## 5 结论

本文提出的电力系统暂态稳定分析及故障扫描方法, 优点在于将复杂的电力系统功角稳定问题转化为相点在一维坐标轴上的简单运动。针对相点运动构造的能量函数无须鉴别临界发电机群, 根据故障后动能最小值提出的稳定指标能够很好地反映有危害故障的严重程度。华北电网 2007 年的计算结果验证了本文提出的暂态稳定分析方法的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 李树广. 电网监控与预警系统的研制[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 77-82.  
Li Shuguang. Development of supervisory control and forewarning systems for power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 77-82(in Chinese).
- [2] 蔡斌, 吴素农, 王诗明, 等. 电网在线安全稳定分析和预警系统[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 36-41.  
Cai Bin, Wu Sunong, Wang Shiming, et al. Power grid on-line security and stability analysis and forewarning system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 36-41(in Chinese).
- [3] 常辉, 刘文颖, 行舟, 等. 电力系统暂态稳定计算的在线应用[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 54-58.  
Chang Hui, Liu Wenyong, Xing Zhou, et al. Online application of power system transient stability computation[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 54-58(in Chinese).
- [4] 汤涌. 电力系统稳定计算隐式积分交替求解[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 1-3.  
Tang Yong. An implicit integration alternating solution method for power system dynamic stability simulation[J]. Power System Technology, 1997, 21(2): 1-3(in Chinese).
- [5] 宋新立, 汤涌, 卜广全, 等. 大电网安全分析的全过程动态仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 23-28.  
Song Xinli, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Full dynamic simulation for the stability analysis of large power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 23-28(in Chinese).
- [6] 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): 94-98.  
Lü Zhilai, Zhang Baohui, Ha Hengxu. Transient stability based corrected potential surface criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 94-98(in Chinese).
- [7] 曾沅, 余贻鑫. 电力系统动态安全域的实用解法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24-28.  
Zeng Yuan, Yu Yixin. A practical direct method for determining dynamic security regions of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 24-28(in Chinese).
- [8] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid transient stability analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-391.
- [9] Rahimi F A, Lauby M G, Wrubel J N, et al. Evaluation of the transient energy function method for on-line security analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 497-507.
- [10] Tang C K, Graham C E, El-Kady M, et al. Transient stability index from conventional time domain simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1524-1530.
- [11] Vaahedi E, Mansour Y, Chang A Y, et al. Enhanced second kick methods for on-line dynamic security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1976-1982.
- [12] Ernst D, Ruiz-Vega D, Pavella 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.
- [13] Fang D Z, Chung T S, Zhang Y, et al. Transient stability limit conditions analysis using a corrected transient energy function [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 804-810.
- [14] 房大中, 周保荣, 宋文南, 等. 修正的暂态能量裕度评估策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 94-98.  
Fang Dazhong, Zhou Baorong, Song Wennan, et al. Strategy for assessment of corrected transient energy margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 94-98(in Chinese).
- [15] Fang D Z, Yang X D. A new method for fast dynamic simulation of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 619-628.
- [16] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 208-209.



孙闻

收稿日期: 2009-01-10。

作者简介:

孙闻(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统暂态稳定分析与控制, E-mail: epsunwen@126.com;

房大中(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、仿真、稳定和控制等方面的研究;

薛振宇(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向

为电力系统安全分析和数据库等。

(责任编辑 王晔)