

计及负荷动态特性的电压稳定概率特征根分析

宗秀红¹, 张尧², 董泰福²

(1. 广东电网公司深圳供电局, 广东 深圳 518020; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 概率特征根分析可以将系统的多种运行方式融入到一次数值计算中, 但是现有的概率特征根分析只考虑了负荷的电压指数依赖特性模型。负荷的动态特性是造成电压不稳定的主要原因, 为此基于一般性的多机系统表达技术(GMR), 将概率特征根分析进行扩展以包含负荷的动态特性模型, 进而根据特征根的概率分布、动态负荷相关比以及特征根对节点电压的电压失稳模式系数确定系统的电压薄弱点, 从而完成了系统多运行方式下的小干扰电压稳定性分析。最后, 对五节点系统进行了计算, 考察了在所确定的电压薄弱点进行电压控制的效果。

关键词: 电压稳定; 概率特征根; 小干扰稳定; 负荷模型; 感应电动机

Voltage stability probabilistic eigenvalue analysis with dynamic load model

ZONG Xiu-hong¹, ZHANG Yao², DONG Tai-fu²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Shenzhen 518020, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Probabilistic eigenvalue analysis can integrate system multi-operating condition into one numerical computation. However, the existing probabilistic eigenvalue analysis only considers the static voltage exponential depending load model. The dynamic load characteristic is the main cause for voltage instability. Hence, the probabilistic eigenvalue analysis is extended to include the dynamic load characteristic model based on the generalized multi-machine representation (GMR) technique. Further, the voltage weak nodes can be determined according to the distribution probabilistic of eigenvalues, the relative ratio of dynamic loads and the voltage instability coefficients of eigenvalues to nodal voltages. Therefore, the small disturbance voltage stability analysis for system multi-operating conditions are completed. In the end, five-bus system is applied to investigate the voltage control effects by installing voltage control devices at the selected voltage weak nodes.

This project is supported by Key project of National Natural Science Foundation of China (No.50337010).

Key words: voltage stability; probabilistic eigenvalue; small disturbance stability; load model; induction motor

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0019-04

0 引言

传统的小干扰电压稳定分析方法^[1,2]通常基于单一的系统运行方式。概率特征根分析^[3~5]则考虑了节点功率运行曲线构成的不确定性因素, 计及了系统的多运行方式, 然而现有的概率特征根分析均是针对功角稳定进行的。文献[6]将概率特征根分析扩展到电压稳定性研究中, 但是所采用的负荷模型仍是静态的电压指数依赖特性模型。

感应电动机负荷是引起电力系统电压失稳的主

要因素, 在电压稳定性分析中有必要考虑负荷的感应电动机模型。为此, 本文在文献[6]的基础上, 仍以正态分布来考虑节点功率运行曲线确定的系统多运行方式, 对现有的概率特征根分析进行扩展以计及负荷的感应电动机模型, 从而进一步分析系统的电压稳定性。

1 概率特征根分析基础

1.1 初始运行状态计算^[5]

对一 N 节点系统, 节点电压采用直角坐标形式, 即 $V = [V_1, V_2, \dots, V_{2N}]^T$ 时, 有概率潮流迭代算式

$$\Delta \bar{S} = J \Delta \bar{V} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50337010)

$$C_v = J^{-1} C_s (J^{-1})^T \quad (2)$$

式中： $\Delta \bar{S}$ 为节点均值注入偏差列向量； $\Delta \bar{V}$ 为 N-R 迭代中节点电压偏差列向量； C_s 和 C_v 分别为节点功率协方差矩阵和节点电压协方差矩阵， C_s 可由节点功率运行曲线获得。

由式(1)和(2)，在概率潮流计算中考虑了节点功率和节点电压的均值和方差的相互影响，从而考虑了节点功率运行曲线所确定的系统多运行方式。

1.2 多机系统的状态空间表达

对于系统的状态方程 $\Delta \dot{X} = A \Delta X$ ，采用一般性的多机系统表达 GMR (Generalized Multi-machine Representation)^[5] 技术，系数矩阵 A 可表达为

$$A = S'(K_a F - K_b) \quad (3)$$

式中： $S' = (I - K_t F)^{-1}$ ； $F = L_1 + L_3 H L_7$ ； $H = -L_9^{-1}$ ； K_a 、 K_b 和 K_t 为相关的系数矩阵； $L_1 \sim L_9$ 及 K_a 、 K_b 和 K_t 的详细描述参见文献[5]。

1.3 特征根的概率分布

由系统均值运行状态处的系数矩阵 A 可计算出特征根均值向量 $\bar{\lambda}$ 。又 λ 为节点电压的函数 $\lambda = G(V)$ ，记 $J_\lambda = \partial \lambda / \partial V$ 并将其线性化有

$$\Delta \lambda = J_\lambda \Delta V \quad (4)$$

则特征根的协方差矩阵为

$$C_\lambda = J_\lambda C_v J_\lambda^T \quad (5)$$

特征根位于复平面的左半平面时认为是稳定的，令 $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$ ，则考虑系统多运行方式时，模式 i 的稳定程度可由 α_i 小于零的概率来估计

$$P_i\{\alpha_i < 0\} = \int_{-\infty}^0 f(\alpha_i) d\alpha_i \quad (6)$$

式中： $P_i\{\cdot\}$ 为模式 i 的稳定概率； $f(\cdot)$ 为随机变量的概率密度函数。

2 计及感应电动机负荷模型

令 $E_x' + jE_y'$ 为同步坐标下电动机的暂电动势；

$U_x + jU_y$ 为负荷节点电压； $I_x + jI_y$ 为流入电动机的电流； p 是微分算子； $X = (X_s + X_m)K_H$ ， $X' = (X_s + X_m // X_r)K_H$ ， $T' = (X_r + X_m) / r_r$ ； T_m 和 T_e 分别为电动机机械力矩和电磁力矩，其中 α 为恒力矩部分， $(1-\alpha)$ 为与滑差有关的力矩， ρ 为与电动机的负荷机械特性有关的指数， $k = k_s / K_H$ 为负荷系数； $T_J = T_J / K_H$ 为电动机惯性时间常数； k_s 和 T_{J_s} 为电动机自身容量基值下的值， K_H 为系统容量基值和电动机自身容量基值之比。考虑机电暂态过程的三阶感应电动机模型可表达为^[7]

$$\begin{cases} T' \cdot pE_x' = sT'E_y' - [E_x' + (X - X')I_x] \\ T' \cdot pE_y' = -sT'E_x' - [E_y' - (X - X')I_x] \\ T_J \cdot ps = T_m - T_e \\ U_x = E_x' - X'I_x + r_s I_x \\ U_y = E_y' + X'I_x + r_s I_y \\ T_e = E_x'I_x + E_y'I_y \\ T_m = k[\alpha + (1-\alpha)(1-s)^\rho] \end{cases} \quad (7)$$

将上式在系统稳态运行点处线性化可得

$$\begin{cases} T' \cdot p\Delta E_x' = T's\Delta E_y' + T'E_y'\Delta s - [\Delta E_x' + (X - X')\Delta I_x] \\ T' \cdot p\Delta E_y' = -T's\Delta E_x' - T'E_x'\Delta s - [\Delta E_y' - (X - X')\Delta I_x] \\ T_J \cdot p\Delta s = \Delta T_m - \Delta T_e \\ \Delta U_x = \Delta E_x' - X'\Delta I_x + r_s \Delta I_x \\ \Delta U_y = \Delta E_y' + X'\Delta I_x + r_s \Delta I_y \\ \Delta T_e = E_x'\Delta I_x + E_y'\Delta I_y + I_x \Delta E_x' + I_y \Delta E_y' \\ \Delta T_m = -k\rho(1-\alpha)(1-s)^{\rho-1} \Delta s = -K_m \Delta s \end{cases} \quad (8)$$

由电动机的线性化模型即可方便获得由零、一阶块表达的电动机模块，如图 1 所示。

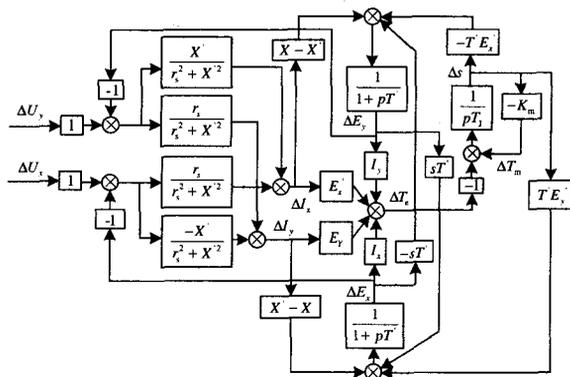


图 1 感应电动机模型

Fig. 1 Induction motor module

将发电机和电动机与外部网络直接相联，多机系统可描述为图 2。仿照文献[8]添加 SVC 的方法，根据 GMR 技术可以在现有的概率特征根分析中方便地计及负荷的感应电动机模型。

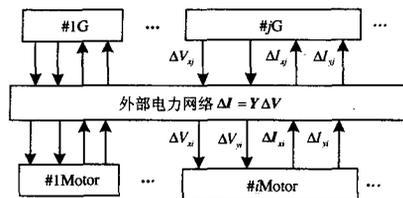


图 2 多机系统表达

Fig.2 Multi-machine system representation

3 电压稳定的概率特征根分析

设节点电压幅值向量为 $V_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}]^T$, 由文献[6], 节点电压幅值偏差与状态变量的关系为

$$\Delta V_i = \begin{bmatrix} V_R \\ V_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_R \\ V_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_I \end{bmatrix} C' \Delta X = C \Delta X \quad (9)$$

式中: C 为 $N \times n$ 的矩阵, n 为状态变量 ΔX 的个数, C' 的表达参见文献[6].

定义状态矩阵 A 的特征值对角阵为 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$; 特征值的右特征向量矩阵 $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$, 则有 $AU = UA$. 定义新的系统状态变量 ΔZ , 使 $\Delta X = U\Delta Z$, 则通过状态变量的相互变换^[7]可得

$$\Delta V_i = CU\Delta Z = W\Delta Z = z_{10}w_1e^{\lambda_1 t} + z_{20}w_2e^{\lambda_2 t} + \dots + z_{n0}w_ne^{\lambda_n t} \quad (10)$$

式中: $W = CU = [w_1, w_2, \dots, w_n]$; w_{ji} 为特征根对节点电压的电压失稳模式系数^[9]; z_{i0} 为 ΔZ_i 的初值.

电力系统稳定性分功角稳定和电压稳定. 设特征根 $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$, 类似于机电回路相关比

$$\rho_i = \frac{\left| \frac{\sum p_{ki}}{\Delta X_k \in (\Delta \delta, \Delta \omega)} \right|}{\left| \frac{\sum p_{ki}}{\Delta X_k \in (\Delta \delta, \Delta \omega)} \right|} \quad (11)$$

定义感应电动机负荷的相关比

$$\rho_{Li} = \frac{\left| \frac{\sum p_{ki}}{\Delta X_k \in (\Delta s, \Delta E_{Lr}, \Delta E_{Ly})} \right|}{\left| \frac{\sum p_{ki}}{\Delta X_k \in (\Delta s, \Delta E_{Lr}, \Delta E_{Ly})} \right|} \quad (12)$$

如果 ρ_i 远大于 1.0, 而 ρ_{Li} 远小于 1.0, 则由该模式导致系统失稳时为功角型失稳, 此类问题已有很多研究^[7-9]; 反之, 为电压型失稳.

在 1.3 部分计算了系统特征根实部小于零的分布概率. 若在 $[\bar{\alpha}_i - 4\sigma_i, \bar{\alpha}_i + 4\sigma_i]$ ($\bar{\alpha}_i + 4\sigma_i < 0$) 范围内存在分布概率小于 1.0 的特征根 (弱稳定或不稳定特征根), 说明系统存在不稳定性因素. 故考虑系统多运行方式时, 根据特征根的分布概率及其相关比可以确定属于电压型稳定问题的弱稳定和不稳定特征根. 对于电压不稳定模式, 如果有部分 w_{ji} 较大, 说明相应节点存在较大的电压不稳定性因素, 故为系统的电压薄弱点.

电压失稳的主要原因是系统无功严重不足, 因此, 可安装电压控制装置 (如并联电容器组和 SVC 等) 对系统进行无功补偿, 进而对特征根 λ_i 进行控

制. 又 w_{ji} 较大时, 相应节点为系统电压薄弱点, 故在这些节点安装电压控制装置将最为有效, 即 w_{ji} 的大小可用于选择电压控制装置的装设地点.

4 算例分析

对图3所示的五节点系统进行了计算分析. 稳态运行的负荷功率和PV节点电压作相应量的均值.

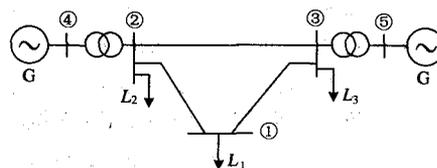


图3 5节点系统
Fig.3 Five-bus system

$S_{L1} = 1.2 + j0.8$ (pu), $S_{L2} = 2.0 + j1.0$ (pu), $S_{L3} = 2.0 + j1.0$ (pu), $P_{G1} = 4.0$ (pu), $V_{G1} = 0.98$ (pu), $V_{G2} = 0.98 + j0$ (pu). 该算例只考虑负荷 L_1 的日运行曲线 (如图 4 所示), 并且对 L_1 考虑一定比例的感应电动机负荷, 感应电动机参数如表 1. 所有的静态负荷均考虑静态电压特性^[10]: $P_L = P_{L0}V^a$, $Q_L = Q_{L0}V^b$, 其中 $a = 1.38$, $b = 3.22$. 发电机采用三阶模型, 参数如表 2, 所有发电机均装有快速励磁设备 (如图 5).

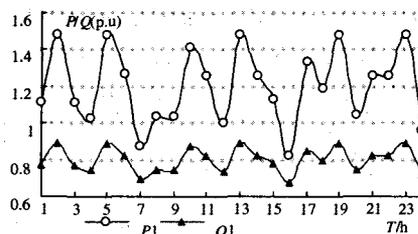


图4 L_1 的日运行曲线
Fig.4 Daily operating profiles of L_1

表 1 感应电动机参数

Tab.1 Induction motor data

r_s^*	X_s^*	X_m^*	r_r^*	X_r^*	T_J^*	α	ρ	s_0
0.0465	0.295	3.5	0.0125	0.12	3.7	0.15	2.0	0.014

表 2 三阶发电机参数

Tab.2 Three-order machine data

	R_a / pu	X_d / pu	X_q / pu	X_d' / pu.	T_{d0}'	M	D
G1	0.000	1.633	1.633	0.179	4.000	2.620	0.000
G2	0.000	0.306	0.306	0.048	6.200	19.60	0.000

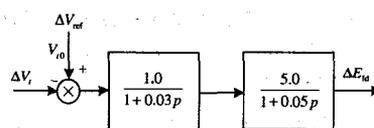


图5 励磁机模型
Fig.5 Exciter module

节点 1 考虑 75% 的感应电动机负荷, 系统产生 12 个特征根如表 3 所示, 其中一零特征根 (由于没有考虑无穷大母线) 没有列出。由表 3, 仅与电动机负荷强相关 ($\rho_{L4} \gg 1.0$) 的特征根 11 位于复平面左半平面的概率小于 1.0, 其它特征根实部小于零的概率均为 1.0, 故特征根 11 为弱稳定模式, 由该特征根导致系统失稳时属于电压型失稳。表 4 为考虑不同比例的感应电动机负荷时特征根 11 及其概率特性。由表 4, 电动机负荷所占的比例越大, 该模式的不稳定概率也就越大, 这与实际系统相符合。

表 3 考虑 75% 感应电动机负荷的特征根及其概率分布

Tab.3 Eigenvalues and their probabilistic properties with 75% induction motor load considered

Mode no. i	$\bar{\alpha}_i$	$\bar{\beta}_i$	σ_{α_i}	$p\{\alpha_i < 0\}$	ρ_i	ρ_{Li}
1	-34.2764	0.00	0.0324	1.0	0.0018	0.0000
2	-33.8950	0.00	0.3274	1.0	0.0010	0.0000
3	-18.9539	0.00	0.2133	1.0	0.0056	0.0000
4	-18.1635	0.00	0.0589	1.0	0.0202	0.0000
5	-1.1454	0.00	0.2028	1.0	0.0036	0.0013
6	-0.8512	0.00	0.1412	1.0	0.0129	0.0069
7,8	-0.4447	8.3039	0.1169	1.0	27.855	0.0004
9,10	-0.1141	0.3627	0.0054	1.0	0.0001	206.47
11	-0.0045	0.00	0.0042	0.8577	0.0000	999.19

表 4 不同比例感应电动机负荷的特征根 11 及其概率特性

Tab.4 The 11th eigenvalues and probabilistic properties with different proportion of induction motor load

Motor proportion	$\bar{\alpha}_i$	σ_{α_i}	$p_i\{\cdot\}$
50%	-0.0111	0.0021	1.0
60%	-0.0084	0.0029	0.9983
70%	-0.0058	0.0037	0.9394
75%	-0.0045	0.0042	0.8577
80%	-0.0033	0.0057	0.5557

为验证特征根分布概率的正确性, 针对图 4 的每一个样本运行状态进行了确定性计算。图 6 给出了考虑 75% 的感应电动机负荷时特征根 11 的样本分布, 该分布与表 4 中特征根 11 的分布概率一致。

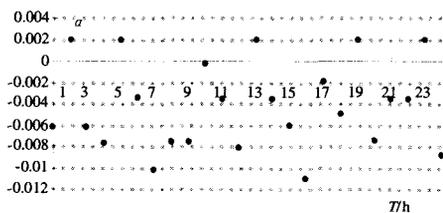


图 6 考虑 75% 感应电动机负荷时特征根 11 的样本分布
Fig.6 Sample distribution of the 11th eigenvalue with 75% induction motor load considered

针对弱稳定的特征根 11, 考虑 75% 的感应电动机负荷时, 该模式对节点电压的电压失稳模式系数

示于表 5。显然对节点 1 的电压失稳模式系数最大, 则考虑系统多运行方式时, 节点 1 存在较大的电压不稳定性因素。电压不稳定的主要原因是系统无功严重不足, 因此节点 1 将是最优的电压控制点或无功补偿点。为简单说明这一点, 分别在各节点补偿相同容量的电容器 ($\omega C=0.6$), 则补偿后的特征根如表 6 所示。值得注意的是, 尽管特征根对发电机节点的电压失稳模式系数的模可能较大, 但是由于符号为负, 在发电机节点的无功补偿效果却是相反的。由表 6, 在节点 1 进行无功补偿效果最佳。

表 5 特征根 11 对节点电压的电压失稳模式系数
Tab.5 Voltage instability mode coefficients of the 11th eigenvalue to nodal voltages

Mode no. i	Voltage instability mode coefficient ω_{ji}				
	ΔV_{i1}	ΔV_{i2}	ΔV_{i3}	ΔV_{i4}	ΔV_{i5}
11	0.5189	0.2467	0.1078	-0.6550	-0.5989

表 6 并联电容器补偿的特征根及其概率特性

Tab.6 The eigenvalue and probabilistic properties with shunt capacitor compensation at each bus

Control Node	$\bar{\alpha}_{11}$	$\sigma_{\alpha_{11}}$	$p_{11}\{\cdot\}$
1	-0.0064	0.0025	0.9948
2	-0.0039	0.0061	0.7357
3	-0.0047	0.0041	0.6948
4	-0.0036	0.0070	0.6948
5	-0.0045	0.0043	0.8554

5 结论

基于一般性的多机系统表达技术, 对现有的小干扰电压稳定的概率特征根分析进行扩展, 计及了负荷的感应电动机机电暂态模型; 由特征根的分布概率及其相关比可确定电压型稳定问题的弱稳定和不稳定特征根, 进而由电压失稳模式系数来确定多运行方式下计及负荷动态模型时电压稳定的薄弱点, 为电压控制点的选择提供了依据。算例分析充分说明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Capitanescu F, Van Cutsem T. Unified Sensitivity Analysis of Unstable or Low Voltages Caused by Load Increases or Contingencies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 321-329.
- [2] Amjady N, Esmaili M. Application of a New Sensitivity Analysis Framework for Voltage Contingency Ranking[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005,20(2): 973-983.
- [3] Chung C Y, Wang K W, Tse C T, et al. Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Analysis and PSS Design in Multimachine Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1439-1445.

(下转第 26 页 continued on page 26)

4 结语

使用PSS使系统机电暂态模型的特征值由复平面的右半平面移到左半平面,提高了系统的鲁棒性。本文对PSS用PSO算法对其参数进行优化,当系统发生小扰动或三相短路故障时,用本文方法设计的PSS能够有效的抑制系统的低频振荡。

由于PSO算法提出的时间不长,算法缺乏深刻的、具有普遍意义的理论分析。其数学基础相对薄弱,且存在许多不完善和未涉及到的问题。以后的研究中我们应该利用有效的数学工具对算法的收敛性,收敛速度的估计,计算的复杂性,鲁棒性,以及预防陷入局部最优和参数设置影响等进行分析。目前,对PSO算法的研究相对其它比较成熟的优化算法应用范围较小,但随着进一步的深入研究,PSO算法将会应用到越来越多的领域中。

参考文献

- [1] 朱方,方思立. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
ZHU Fang, FANG Si-li. The Principles and Applications of Power System Stability[M]. Beijing:China Electric Power Press, 1996.
- [2] 蔡超豪,王奇. 基于 H_{∞} 控制理论的电力系统稳定器[J]. 电网技术,2000,24(10):11-14.
CAI Chao-hao,WANG Qi. A Power System Stabilizer Based on H_{∞} Control Theory[J]. Power System Technology,2000,24(10):11-14.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proc IEEE Int Conf on Neural Networks[C]. Perth: 1995.1942-1948.
- [4] Eberhart R C, Shi Y H. Particle Swarm Optimization: Development, Applications and Resources [A]. In: Proceedings of Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul Korea: 2001. 81-86.
- [5] Kundar P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- 收稿日期:2007-06-11; 修回日期:2007-08-07
作者简介:
荣雅君(1975-),女,教授,研究领域为电力系统暂态稳定、电力系统继电保护;
贾艳(1982-),女,硕士在读,研究领域为智能算法。
E-mail:xibeifengse@163.com
-
- (上接第22页 continued from page 22)
- [4] 王克文,谢志棠,史述红,等. 基于概率特征根分析的电力系统稳定器参数设计[J]. 电力系统自动化,2001,25(11):20-23.
Wang K W, Tse C T, Shi Shuhong, et al. Power System Stabilizer (PSS) Parameter Design Based on Probabilistic Eigenvalue Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(11): 20-23.
- [5] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account of the Variation of Load Power[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46: 221-227.
- [6] 宗秀红,张尧,武志刚. 电压稳定的概率特征根分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):61-65.
ZONG Xiu-hong, ZHANG Yao, WU Zhi-gang. Probabilistic Eigenvalue Analysis for Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 61-65.
- [7] 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.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis for Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] 谢志棠,宗秀红,钟志勇,等. 计及FACTS装置的概率特征根分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):13-17.
Tse C T, ZONG Xiu-hong, CHUNG C Y, et al. Probabilistic Eigenvalue Analysis Including FACTS Devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 13-17.
- [9] 刘明波,程劲晖,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化,1999,23(16):27-30.
LIU Ming-bo, CHENG Jin-hui, CHENG Ying. Dynamic Voltage Stability Analysis of Parallel AC/DC Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 27-30.
- [10] Chung C Y, Wang K W, Cheng C K, et al. Machine and Load Modeling in Large Scale Power Industries[A]. In: Proc of Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop[C]. IEEE Industry Applications Society. 1998: 7-15.
- 收稿日期:2007-08-19; 修回日期:2007-11-13
作者简介:
宗秀红(1978-),女,博士,从事电力系统稳定控制与继电保护的研究与工作; E-mail:xhzhong2006@163.com
张尧(1948-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统分析及电压稳定的研究工作;
董泰福(1976-),男,硕士研究生,主要进行电力系统故障诊断、电力市场等研究。