

多运行方式下的概率暂态稳定计算

司马瑞, 王克文

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 在电力系统暂态稳定计算中, 当考虑负荷波动影响时, 发电机状态变量具有分布特性。变量的分布特性由其数字特征来描述, 例如均值与协方差。利用概率潮流的计算结果确定发电机初始运行状态的分布特性; 进而利用小干扰稳定分析中的系统矩阵, 系统化表达暂态稳定数值计算中相邻时刻间的变量关系, 实现多系统运行方式下的概率暂态稳定分析。所得结果为发电机功角摇摆曲线的分布特性。所述算法在一8机系统上进行了试算。

关键词: 暂态稳定; 概率; 均值; 协方差

Probabilistic transient stability calculation under multi-operation conditions

SI Ma-rui, WANG Ke-wen

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the calculation of power system transient stability, generator state variables will possess distribution characteristic when considering the effect of load variation. The distribution characteristic of variables can be described by their numerical characteristics, such as expectation and covariance. The distribution property of generators in initial operating state is determined from the results of probabilistic power flow computation under system multi-operation conditions. Then the coefficient matrix used in small signal stability analysis is applied to systematically describe the variable relationship between adjacent time periods in the transient stability calculation. So the probabilistic transient stability analysis under multi-operation conditions is achieved. Obtained results are the distribution characteristics of generator power-angle swing curves. The proposed approach is examined on an eight-machine system.

Key words: transient stability; probability; expectation; covariance

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0007-05

0 引言

电力系统暂态稳定分析方法大体包括数值积分法^[1-2]和直接法^[3-4]。数值积分法属传统算法, 具有数值计算稳定的特点, 已得到广泛应用。直接法及其发展而成的混合算法^[5], 计算速度快, 有在线应用的优势。

基于数值积分法的传统暂态稳定计算通常基于单一的系统运行方式, 即确定性的网络结构、网络参数和系统运行参数, 因而得到的功角摇摆曲线也是确定性的。从统计的观点出发, 受系统运行方式变化等因素的影响, 相关变量具有分布特性, 并可用相应的统计数字特征描述。

可计及系统统计特性的概率处理方法已成功应用于电力系统的潮流计算^[6]、无功优化^[7]和稳定性分析^[8-9]等方面。所考虑的不确定性因素可以是节点

功率波动、负荷预测误差、控制器参数误差等。

在概率暂态稳定分析中, 不确定因素通常是指故障类型、故障位置和故障切除时间的随机性^[9]。文献[9]将连续变量离散化, 根据每种随机因素的故障率, 计算出总的系统期望失稳频率。文献[10]以节点注入功率运行曲线为基础, 形成系统的多运行方式, 利用线性化系统模型, 计算初始状态下发电机变量的概率特性。该作者在文献[11]中进一步将所提算法发展为保留非线性项。迄今为止, 未见能够计算出功角摇摆曲线概率特性的报道。

本文先利用全系统微分方程和代数方程, 在稳态条件下形成系统化的线性化解析表达, 确定多运行方式下的发电机初始运行状态的分布特性。进而利用小干扰稳定分析中的系统矩阵, 系统化表达暂态稳定数值计算中相邻时刻间的变量关系, 实现多系统运行方式下的概率暂态稳定分析, 得到发电机

功角摇摆曲线的分布特性。

1 概率暂态稳定性分析的基本思路

当考虑节点注入功率变化时，相关变量具有统计特性。所有状态变量与非状态变量均可由统计特性描述，例如均值、协方差等。概率分析方法的目的是为了得到结果变量的统计特性，关键在于输出变量与输入变量之间的解析表达。

假设输出变量 Y 与输入变量 Z 之间存在关系 $Y = W(Z)$ ，线性化后得 $\Delta Y = K \Delta Z$ ，其中 K 为一阶系数矩阵。则由 Z 的统计特性可以求出 Y 的统计特性，例如由 Z 的均值计算 Y 的均值，由 Z 的协方差计算 Y 的协方差。因此，可由节点注入功率或节点电压协方差计算出功角摇摆曲线的分布特性。如要提高计算精度，可引入高阶项的修正。

由于暂态稳定分析中涉及到大量的微分方程和代数方程，表达复杂，清晰明了的系统化解析表达有利于概率暂态稳定模型的建立与计算。

概率计算所得功角摇摆曲线也不再是单一的一条线，而是具有分布特性的带状范围。

本文考虑初始运行方式波动（节点注入功率变化等）对大干扰下暂态稳定性的影响。在暂态稳定计算中利用传统的微分-代数方程表达；变量的概率特性采用线性化表达，即对负荷的波动引起的状态变量的变化（由于系统初始条件不同，状态变量在某一时刻的值不同）采用线性化描述。

2 系统化解析表达

2.1 初始运行条件下的线性化表达

由概率潮流计算可以得到用节点电压描述的系统初始运行状态，为了得到发电机初始运行状态的统计特性，需得到状态变量与电压的解析关系。

在电力系统暂态稳定计算模型中，包含有电力网络、发电机以及相关控制设备。全系统的动态表达可用微分-代数方程组描述：

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, Y) & (1a) \\ 0 = G(X, Y) & (1b) \end{cases}$$

式中： X 为状态变量； Y 为非状态变量， F 、 G 为相应的非线性表达。

式（1）的线性化表达为：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X}{dt} = \tilde{A}\Delta X + \tilde{B}\Delta Y & (2a) \\ 0 = \tilde{C}\Delta X + \tilde{D}\Delta Y & (2b) \end{cases}$$

其中： \tilde{A} 、 \tilde{B} 、 \tilde{C} 、 \tilde{D} 为一阶导数构成的系数矩阵。

系统的初始运行状态属于稳态，式（2a）的左侧取 0，从而转化为代数方程，为方便起见，重写为：

$$\begin{cases} 0 = \tilde{A}_{(0)}\Delta X + \tilde{B}_{(0)}\Delta Y & (3a) \\ 0 = \tilde{C}_{(0)}\Delta X + \tilde{D}_{(0)}\Delta Y & (3b) \end{cases}$$

下标“(0)”表示初始运行状态。式（3）形成扩展的代数方程组。为了得到状态变量与节点电压之间的解析表达，可以利用高斯消去技术，但需进行以下处理。

1) 稳态化的算式（3a）中某些方程失去意义，应该剔除。例如，转子运动方程中的 $\frac{d\delta}{dt} = \omega_s(\omega - 1)$ ，其中： δ 为转子位置角； ω_s 为额定电气角速度； ω 为电气角速度。

在具体形成式（2b）时，采用类似于节点导纳阵的形成方法，描述电力网络的节点导纳阵可直接插入其中。

显然，式（2）的线性化表达与小干扰稳定分析中的表达类似，因此可借用小干扰稳定分析中成熟的“插入式”建模技术^[12]形成相应的系数矩阵。

由于矩阵维数较高，充分利用稀疏技术有利于计算速度和精度的改善。

2) 为利用高斯消去技术得到式（3）中的状态变量与节点电压之间的关系，需将变量重新排序。依次为：其它变量列向量 N ，状态变量列向量 X ，电压列向量 V 。 N 包含了除电压外的非状态变量。

在如图 1 所示的消去结果图中，只需消去完状态变量 X 对应的行。“1”为单位子阵。

$$\begin{matrix} & N & X & V \\ N & \begin{pmatrix} 1 & \times & \times \end{pmatrix} \\ X & \begin{pmatrix} 0 & 1 & K \end{pmatrix} \\ V & \begin{pmatrix} 0 & 0 & \times \end{pmatrix} \end{matrix}$$

图 1 消去结果图

Fig.1 Result by Gauss elimination

对应的关系式为：

$$\Delta X = J \Delta V \quad (4)$$

其中： $J = -K$ 。

式（4）为包含全系统状态变量的表达式，在文

献[10-11]提到的算法中, 所得关系式并未作类似的系统化处理, 而是根据所需变量直接得出关系式。

2.2 相邻时刻状态变量的关系

潮流计算中的节点电压能完整描述系统运行方式, 所以可选电压作为基本变量, 暂态稳定分析中状态变量也可以完整描述系统运行, 因此只确定状态变量的分布特性即可。

数值积分方法通过数值解法求取受扰动微分方程组的时间解。积分步长为 h , 当由 t 时刻的值计算 $t+h$ 时刻的值时, 不管采用何种数值计算方法, $t+h$ 与 t 时刻之间的变量关系总可以按泰勒级数展开:

$$\mathbf{X}_{(t+h)} = \mathbf{X}_{(t)} + \mathbf{X}_{(t)}^{(1)}h + \mathbf{X}_{(t)}^{(2)}\frac{h^2}{2!} + \mathbf{X}_{(t)}^{(3)}\frac{h^3}{3!} + \dots \quad (5)$$

式中: 右上角括号表示取导数。在多运行方式下, 式(5)中包括高阶项在内的所有变量都具有分布特性。

由此可以确定相邻两时刻之间变量的解析关系。以仅保留一阶项为例, 有:

$$\mathbf{X}_{(t+h)} = \mathbf{X}_{(t)} + \left. \frac{d\mathbf{X}}{dt} \right|_t h = \mathbf{X}_{(t)} + \mathbf{F}(\mathbf{X}_{(t)}, \mathbf{Y}_{(t)})h \quad (6)$$

式中: \mathbf{F} 含义与式(1)中相同。将式(6)线性化,

$$\Delta\mathbf{X}_{(t+h),i} = \Delta\mathbf{X}_{(t),i} + \left(\sum_j \left. \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \right|_t \Delta\mathbf{X}_{(t),i} + \sum_j \left. \frac{\partial F_i}{\partial Y_j} \right|_t \Delta\mathbf{Y}_{(t),i} \right) h \quad (7)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$, n 为发电机状态变量个数。

写成矩阵形式:

$$\Delta\mathbf{X}_{(t+h)} = \Delta\mathbf{X}_{(t)} + (\tilde{\mathbf{A}}_{(t)}\Delta\mathbf{X}_{(t)} + \tilde{\mathbf{B}}_{(t)}\Delta\mathbf{Y}_{(t)})h \quad (8)$$

式中:

$$\tilde{\mathbf{A}}_{(t)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}_t, \tilde{\mathbf{B}}_{(t)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Y_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial Y_m} \end{bmatrix}_t$$

其中: m 为非状态变量个数。注意到, $\tilde{\mathbf{A}}_{(t)}$ 维数比 $\tilde{\mathbf{A}}_{(0)}$ 维数要高。

t 时刻下对应于式(2b)的代数方程为:

$$0 = \tilde{\mathbf{C}}_{(t)}\Delta\mathbf{X}_{(t)} + \tilde{\mathbf{D}}_{(t)}\Delta\mathbf{Y}_{(t)} \quad (9)$$

为了得到相邻两时刻发电机状态变量的解析表达式, 将式(9)代入式(8)消去非状态变量后得:

$$\Delta\mathbf{X}_{(t+h)} = \Delta\mathbf{X}_{(t)} + (\tilde{\mathbf{A}}_{(t)} - \tilde{\mathbf{B}}_{(t)}\tilde{\mathbf{D}}_{(t)}^{-1}\tilde{\mathbf{C}}_{(t)})\Delta\mathbf{X}_{(t)}h =$$

$$\Delta\mathbf{X}_{(t)} + \mathbf{A}_{(t)}\Delta\mathbf{X}_{(t)}h = (\mathbf{I} + h\mathbf{A}_{(t)})\Delta\mathbf{X}_{(t)} = \mathbf{D}_{(t)}\Delta\mathbf{X}_{(t)} \quad (10)$$

由于是全系统动态特性的表达, 所以线性化式子中的 \mathbf{A} 阵与小干扰分析中的 \mathbf{A} 阵一致, 可以利用小干扰插入式建模方法^[12]形成某时刻 t 的 $\mathbf{A}_{(t)}$ 阵。

2.3 暂态过程中发电机状态变量分布特性计算

统计特性可以由其数字特征描述, 例如均值与方差等。

1) 状态变量的均值可以由一般的暂态稳定计算方法得到。

2) 方差计算可利用线性化表达。

首先根据概率潮流计算结果(电压协方差(计算初始时刻所有状态变量的方差。利用式(4)的表达可得到协方差表达式:

$$\mathbf{C}_X = \mathbf{J}\mathbf{C}_V\mathbf{J}^T \quad (11)$$

式中: \mathbf{C}_X 为状态变量的协方差矩阵; \mathbf{C}_V 为电压的协方差矩阵; \mathbf{J} 含义同式(4)。

然后可以由前一时刻发电机状态变量的协方差求出其下一时刻的协方差。利用式(10)的表达可得到协方差表达式:

$$\mathbf{C}_{x(t+h)} = \mathbf{D}_{(t)}\mathbf{C}_{x(t)}\mathbf{D}_{(t)}^T \quad (12)$$

式中: $\mathbf{C}_{x(t)}$ 、 $\mathbf{C}_{x(t+h)}$ 分别为 t 时刻与 $t+h$ 时刻状态变量的协方差矩阵。

若要提高计算精度, 可引入高阶项修正。但高阶数字特征的使用会带来计算量的增加。

3 计算步骤

计算步骤简述如下:

1) 读取原始数据, 置时间 $t=0$, 使用概率潮流程序^[6]计算初始状态下电压的均值和协方差阵 \mathbf{C}_V 。

2) 计算式(3)中系数矩阵, 利用高斯消去得到式(4)中的 \mathbf{J} 阵。

3) 对初始运行状态, 由式(11)计算发电机状态变量的均值和协方差阵 $\mathbf{C}_{x(0)}$ 。

4) 判断系统有无故障或操作, 有则修改微分方程或代数方程。否则转 6)。

5) 判断是否有网络故障或操作。若有, 则解网络方程并重新计算非状态变量 $\mathbf{Y}_{(t)}$ 的均值; 否则转 6)。

6) 计算下一时刻非状态变量 $\mathbf{Y}_{(t+h)}$ 和状态变量 $\mathbf{X}_{(t+h)}$ 的均值。

7) 计算 $\mathbf{A}_{(t)}$ 阵, 由式(10)计算 $\mathbf{D}_{(t)}$ 阵, 由式(12)计算下一时刻状态变量的协方差阵 $\mathbf{C}_{x(t+h)}$ 。

8) 判断系统是否稳定。若系统稳定, 则置 $t=t+h$, 转 4); 否则转 10)。

- 9) 判断 t 是否大于 t_{max} 。是则转 10); 否则转 4)。
- 10) 输出计算结果。

4 算例分析

在 Visual Fortran 6.6 语言下, 按照所述方法编程, 考虑了对各种算例、控制装备的通用性, 发电机适用于 3 到 6 阶模型, 并在矩阵求逆等过程中充分使用稀疏技术。

图 2 所示为 8 机 24 节点系统, 24 节点为平衡节点。发电机均配有励磁调节器和原动机调速器, 负荷采用恒定阻抗模型。故障类型为 8—11 线路 8 端三相接地短路, 设短路在发生 0.1 s 后消失。

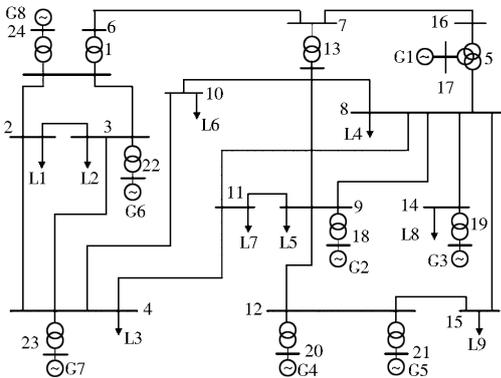


图 2 八机系统图

Fig.2 Eight-machine system

各节点功率和 PT 节点电压的标准日运行曲线见文献[6]。从运行曲线中生成 720 个运行样本来模拟系统的多运行方式。先用概率潮流程序计算电压均值和协方差, 然后按所提方法进行概率暂态稳定计算。结果列于表 1、表 2 和表 3。其中, 24 节点为表 2、表 3 中的功角参考点; 表 2、表 3 中均值和

表 1 概率潮流计算结果

Tab.1 Results of probabilistic power flow

节点	电压实部	电压虚部	电压实部	电压虚部
	均值/p.u.	均值/p.u.	自方差	自方差
1	1.075 187 3	-0.060 022 3	0.348 827E-03	0.903 355E-03
2	0.986 944 5	-0.111 153 0	0.311 536E-02	0.463 046E-02
3	1.011 463 2	-0.087 505 3	0.298 838E-02	0.520 954E-02
4	1.019 047 1	-0.166 638 6	0.139 892E-02	0.136 726E-01
5	0.951 962 0	-0.235 995 2	0.277 972E-02	0.877 249E-02
6	1.113 899 8	-0.104 557 7	0.644 092E-03	0.239 071E-02
7	1.056 683 2	-0.171 025 6	0.155 557E-02	0.620 700E-02
8	0.973 540 1	-0.246 216 8	0.309 247E-02	0.940 759E-02
9	1.017 873 4	-0.157 591 1	0.132 285E-02	0.808 941E-02
10	0.983 477 6	-0.236 849 7	0.258 470E-02	0.108 668E-01
⋮				

方差的准确值是用 720 个运行方式分别进行潮流计算和暂态稳定计算, 从结果样本中求得的; 标准差为自方差的平方根; 限于篇幅, 协方差未列出。

表 2 功角初值

Tab.2 Initial value of power-angle

功角	均值/deg	均值/deg	标准差	标准差
	(准确值)	(概率算法)	/deg (准确值)	/deg (概率算法)
δ_1	51.345 288	51.542 783	5.244 3	6.272 7
δ_2	33.662 784	34.007 596	5.779 7	8.692 7
δ_3	26.782 716	27.266 122	6.310 8	8.326 1
δ_4	25.146 604	25.398 089	5.492 0	5.443 4
δ_5	24.362 987	24.610 489	5.486 6	5.638 3
δ_6	44.083 409	44.272 089	3.278 9	3.914 2
δ_7	2.855 802 0	3.095 626	7.250 1	9.323 1
δ_8	3.183 502 6	3.182 044	0.249 7	0.397 0

表 3 第三台机功角的均值和自方差

Tab.3 Expectations and self-variances of the third generator power-angle

时间 /s	δ_3 均值/deg	δ_3 均值/deg	δ_3 标准差 /deg	δ_3 标准差 /deg
	(准确值)	(概率算法)	(准确值)	(概率算法)
0.1	34.089 3	34.576 6	6.287 4	6.308 2
0.2	51.003 1	51.498 4	5.672 2	5.580 6
0.3	66.103 0	66.656 1	3.861 7	4.634 4
0.4	75.484 8	76.173 8	1.839 1	3.569 1
0.5	77.369 0	78.024 0	2.996 6	2.916 3
0.6	76.086 9	76.345 9	3.523 7	4.010 7
0.7	78.678 6	78.457 3	2.446 5	2.137 1
0.8	87.594 6	87.391 8	4.715 4	4.795 7
0.9	99.857 9	100.111 4	1.873 6	5.505 7
1.0	112.383 3	113.340 9	8.995 4	9.362 1
1.1	122.431 7	124.140 1	8.491 2	8.428 2
1.2	126.806 8	129.098 6	6.617 7	10.371 3
1.3	124.549 0	126.657 8	5.958 8	7.941 2
1.4	119.249 8	120.418 2	6.846 8	11.573 7
1.5	115.127 2	115.383 6	8.153 2	15.886 3

表 1 为概率潮流计算结果, 因电压协方差太多, 未给出。由于采用完整二阶模型^[6], 计算的电压均值与协方差精度标幺值下可达 10^{-7} ^[6]。

表 2 为初始运行状态下, 各发电机功角的均值与自方差, 未列协方差。状态变量初值的计算采用线性化表达。

概率暂态稳定计算可以基于任何数值积分方

法, 本文旨在对概率暂态稳定计算的初步尝试, 在数值解法上仅采用欧拉法。

由表 2 可知, 第七台机功角的均值误差最大, 相对误差为 28.5%, 第八台机的自方差误差最大, 相对误差达 59.0%。如果考虑二阶项的修正, 误差可能会减少。

表 3 中为第三台机功角的均值与自方差。根据文献[6], 当采用线性化模型时方差的误差很大, 由于本文计算采用线性化模型, 方差误差也很大, 在此仅选择误差较小的第三台机功角数据来说明本文算法的可行性。

由表 3 中功角均值, 功角幅度随时间变小, 但考虑方差影响后, 不能明确说明功角就是变小的。计算过程中, 因目前研究方法尚未保留高阶项, 在计算过程中不断采用线性化模型, 会造成计算误差上升。若概率暂态稳定分析中保留高阶项应该能提高变量均值与协方差的计算精度。

由于本文采用系统化的表达, 发电机所有状态变量的自方差和协方差都可以算出, 鉴于数据太多, 误差较大, 在此不再列出。

5 结论

本文以节点注入功率和 PT 电压运行曲线为基础, 选取状态变量为基本变量, 通过数值积分方法确定相邻两时刻之间变量的解析关系, 实现多系统运行方式下的概率暂态稳定分析。由于对表达式系统化处理, 可以在一次计算中同时得到全部状态变量的协方差。但因为采用了线性化模型, 所得功角摇摆曲线的协方差误差较大。可以采用保留高阶项的模型, 进一步改善计算精度。

参考文献

- [1] 苏思敏. 基于混合积分法的电力系统暂态稳定时域仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (15): 56-59.
SU Si-min. A Mixed Integral Method of Time Domain Simulation for Power System[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (15): 56-59.
- [2] 王蕾, 胡祥勇, 李咸善, 等. 电力系统动态仿真的一种改进迭代算法[J]. 继电器, 2006, 34 (14): 42-45.
WANG Lei, HU Xiang-yong, LI Xian-shan, et al. An Improved Alternate Iteration Method for Simulation of Power System Dynamics[J]. Relay, 2006, 34 (14): 42-45.
- [3] 徐箭, 陈允平, 樊友平, 等. 基于扩展等面积准则的电力系统动态安全域[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (31): 20-26.
XU Jian, CHEN Yun-ping, FAN You-ping, et al. Dynamic Security Regions of Electric Power System Based on Extended Equal-area Criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (31): 20-26.
- [4] 刘强, 薛禹胜, 等. 基于稳定域及条件概率的暂态稳定不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 1-6.
LIU Qiang, XUE Yu-sheng, et al. Non-deterministic Analysis for Transient Stability Based on Transient Stability Domain and Conditional Probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (19): 1-6.
- [5] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 提高暂态稳定计算效率的势能界面法[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34 (9): 49-53.
Lü Zhi-lai, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu. Potential Energy Boundary Surface Method for Increasing Transient Stability Assessment Efficiency[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2000, 34 (9): 49-53.
- [6] 张建芬, 王克文, 宗秀红, 等. 几种概率潮流模型的准确性比较分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2003, 24 (4): 32-36.
ZHANG Jian-fen, WANG Ke-wen, ZONG Xiu-hong, et al. Comparison and Analysis of Several Probabilistic Load Flow Approaches[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2003, 24 (4): 32-36.
- [7] 王佳贤, 程浩忠, 湖泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术, 2008, 32 (19): 56-61.
WANG Jia-xian, CHENG Hao-zhong, HU Ze-chun. Optimal Reactive Power Planning for Distribution Systems Considering Multi-load Levels[J]. Power System Technology, 2008, 32 (19): 56-61.
- [8] 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 Ke-wen, XIE Zhi-tang, SHI Shu-hong, et al. Power System Stabilizer (PSS) Parameter Design Based on Probabilistic Eigenvalue Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (11): 20-23.
- [9] 曹一家, 陈文振, 程时杰. 电力系统暂态稳定性的概率分析[M]. 海军工程学院学报, 1994 (2): 44-49.
CAO Yi-jia, CHEN Wen-zhen, CHENG Shi-jie. Probabilistic Analysis of Power Systems Transient Stability[J]. Journal of Naval Academy of Engineering, 1994 (2): 44-49.

(下转第 21 页 continued on page 21)

- 统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (6): 7-12.
ZHAO Guo-bo, LIU Tian-qi. Reactive Power Optimization Based on Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2007, 19 (6): 7-12.
- [9] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer[A]. in: Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence[C]. Anchorage(USA): 1998. 69-73.
- [10] LIU Wei, WANG Ke-jun, TANG Mo. Study on Power System Load Forecasting Based on MPSO Artificial Neural Networks[A]. in: The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Dalian: 2006. 2728-2732.
- [11] Jung, Sung Hoon. Queen-bee Evolution for Genetic Algorithms[J]. Electronics Letters, 2003, 39 (6): 575-576.
- [12] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于人工鱼群算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2004, 32 (19): 9-13. TANG Jan-dong, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, et al. Reactive Power Optimization of Power System Based on Artificial Fish-swarm Algorithm[J]. Relay, 2004, 32 (19): 9-13.
- [13] 黄华, 熊信良, 吴耀武, 等. 基于Box算法的无功优化配置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (20): 32-36. HUANG Hua, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, et al. Reactive Power Optimization Based on Box Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (20): 32-36.
- [14] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[J]. 北京: 清华大学出版社, 2007. ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun, YAN Zheng. Advanced Analysis of Power System[J]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [15] 屈立国. 遗传算法在地区电网无功优化模块中的应用[D]. 太原: 中北大学, 2008. QU Li-guo. Application of Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization of District Power System[D]. Taiyuan: North University of China, 2008.
- [16] 寸巧萍. 基于量子遗传算法的电力系统无功优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. CUN Qiao-ping. Reactive Power Optimization of Power System Based on the Quantum Genetic Algorithm[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

收稿日期: 2009-05-17; 修回日期: 2009-08-05

作者简介:

刘伟(1971-), 男, 教授, 博士, 从事电力系统智能控制的研究; E-mail: oliuwei@163.com

梁新兰(1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化的研究;

安晓龙(1984-), 男, 助理工程师, 从事电力系统自动化的研究。

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [10] 胡金磊, 张尧, 郭力, 等. 多运行方式下发电机变量的概率特性计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (11): 39-43. HU Jin-lei, ZHANG Yao, GUO Li, et al. Probabilistic Characteristic Calculation of Generator Variables Under Multi-operating Conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (11): 39-43.
- [11] 胡金磊, 张尧, 胡文锦, 等. 发电机变量概率特性计算及对概率稳定的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1469-1473. HU Jin-lei, ZHANG Yao, HU Wen-jin, et al. Probability Characteristic Calculation of Generator Variables and Its Effect on Probabilistic Stability[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (7): 1469-1473.
- [12] 钟志勇, 谢志棠, 王克文. 适用于电力系统动态稳定分析的元件建模新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (3): 30-33. ZHONG Zhi-yong, XIE Zhi-tang, WANG Ke-wen. A Novel Modeling Technique for Modern Power System Dynamic Studies[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (3): 30-33.

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-07-13

作者简介:

司马瑞(1984-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统暂态稳定分析; E-mail: simaruirui@163.com

王克文(1964-), 男, 教授, 博士, 长期从事电力系统稳定分析与控制方面的工作。