

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.06.012

考虑随机激励的电力系统机电暂态过程模型

鞠平^{1,2}, 李洪宇^{1,2}, 薛禹胜³, 刘咏飞^{1,2}, 吴峰^{1,2}

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 国网电力科学研究院南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对电力系统机电暂态过程, 构建考虑随机激励的简化模型。给出单机无穷大系统和两机电力系统机电暂态过程随机模型, 并基于 EEAC 理论构建多机电力系统机电暂态过程等效随机模型。结果表明, 在较强假设下, 多机电力系统机电暂态过程随机模型可以简化为等效的单机无穷大系统模型, 模型参数分为常数和时变两种情况, 随机激励可以表达为多频率随机激励的叠加。最后, 给出仿真算例。算例表明, 在随机激励下, 功角曲线呈现出有规律的振荡, 且其基本上是一个频率。

关键词: 电力系统; 随机性; 机电暂态过程

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2013)06-0536-06

Stochastic models for study of electromechanical transient process in power systems

JU Ping^{1,2}, LI Hongyu^{1,2}, XUE Yusheng³, LIU Yongfei^{1,2}, WU Feng^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A simplified stochastic model considering stochastic excitation was developed for the study of the electromechanical transient process in power systems. First, stochastic models considering stochastic excitation were built for electromechanical transient processes in the one-machine infinite bus (OMIB) system and the two-machine power system. Then, based on the EEAC theory, the stochastic models considering stochastic excitation for the multi-machine power system were deduced. The results show that under approximate conditions, the stochastic model of the multi-machine power system can be simplified as the model of the OMIB system, and the model parameters may be constant or time-varying according to different assumptions. The stochastic excitation may be considered the superposition of stochastic excitations that have different frequencies. Finally, simulations were performed. The simulation results show that, when affected by the stochastic excitation, the rotor angle curve exhibited regular oscillations with frequencies that were almost the same.

Key words: power system; stochastic; electromechanical transient process

随着可再生能源发电量和电动汽车负荷量在电网中的比重日益增加, 给电网带来的随机波动也越来越明显。研究表明, 随机扰动可能给电网带来不利影响^[1], 甚至影响系统的稳定性^[2-4]。传统的机电暂态过程模型着重描述机械功率、电磁功率与功角等之间的确定性关系^[5-8], 无法描述随机扰动接入电网后的机电暂态过程。若运用确定性模型进行分析, 就无法考虑随机因素的影响, 也就无法保证电网的安全稳定运行。因

收稿日期: 2013-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(51137002, 51190102); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB228204)

作者简介: 鞠平(1962—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士, 主要从事电力系统建模与控制研究。E-mail: pju@hhu.edu.cn

此,在传统的确定性模型中引入随机因素,建立随机性模型具有重要意义。

随机性是电力系统建模的难点之一^[9]。虽然随机动力学理论已得到相当的发展^[10],但是电力系统引入随机因素却只有 30 多年的历史^[11]。近年来,国内外学者对电网引入随机因素后的潮流、电压稳定、经济调度等问题进行了研究^[2-3,12-14],但是,对于随机激励下电力系统机电暂态过程研究较少。文献[15]提出了单机无穷大(one machine to infinite bus, OMIB)系统随机模型,并对系统的稳定性进行了研究。文献[16]基于 OMIB 系统随机模型,研究了随机波动下系统的首次穿越问题。这些研究运用的模型不是过于简单,就是无法适用于机电暂态过程分析。显然,模型的正确性决定了研究结果的正确性^[17],而目前对于多机电力系统在随机激励下机电暂态过程还缺乏相应的模型。

本文通过合理假设,构建了单机无穷大系统和两机电力系统机电暂态过程随机模型,并基于 EEAC 理论^[18],推导了多机电力系统机电暂态过程简化模型,最后通过仿真算例进行了应用计算。

1 OMIB 系统机电暂态过程随机模型

OMIB 系统(图 1)是电力系统模型的基础。因本文主要研究随机激励下的机电暂态过程,所以发电机采用二阶摇摆方程。假设:(a)内电势 E' 恒定;(b)忽略暂态凸极效应;(c)机械功率 P_m 恒定。

在确定性情况下,发电机转子运动方程(即摇摆方程)为

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt} = P_m - P_e \tag{1}$$

其中 $P_e = P_{\max} \sin(\delta - \nu)$ (2)

式中: δ ——功角; P_e ——电磁功率; M ——惯性时间常数; D ——阻尼系数; t ——时间; $P_{\max}$ ——最大电功率, ν ——阻抗角,一般为正值。如果近似地忽略电阻,则有:

$$P_{\max} = \frac{E' U}{X_{\Sigma}} \tag{3}$$

式中: U ——无穷大母线电压; X_{Σ} ——系统的总电抗。稳态时满足:

$$P_m = P_{e,0} = P_{\max} \sin(\delta_0 - \nu) \tag{4}$$

式中: $P_{e,0}$ —— P_e 的稳态值; δ_0 —— δ 的稳态值。

需要注意的是,所有变量和参数均为标么值(包括 ω, t, M),其中时间参数要以秒乘以 W_N :

$$\omega_N = 2 \pi f_N = 314.16 \quad \omega = \frac{d \delta}{dt} \tag{5}$$

式中: ω_N ——发电机转子额定角速度; ω ——发电机转子角速度; f_N ——额定频率,即 50 Hz。

随机激励可以理解为可再生能源发电或电动汽车等负荷产生的随机功率波动,其结果均造成了机械功率与电磁功率间的不平衡。本文用随机激励项 P_L 来表示这些功率波动的总和,所以 P_L 取正、负号均可。因为在较短时间内随机激励一般围绕某一均值波动^[15],故这些波动在一般情况下可以近似假设为高斯过程。体现在发电机转子运动方程(式(1))右侧加入 P_L ,则有

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt} = P_m - P_e - P_L \tag{6}$$

假设 $P_L = \sigma W(t)$ (7)

式中: $W(t)$ ——标准高斯过程(即均值为 0,方差为 1); σ^2 —— P_L 的方差。

将式(2)、式(4)和式(7)代入式(6),得 OMIB 系统机电暂态过程随机模型:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt} = P_{\max} \sin(\delta_0 - \nu) - P_{\max} \sin(\delta - \nu) - \sigma W(t) \tag{8}$$

2 两机电力系统机电暂态过程随机模型

两机电力系统如图 2 所示。在随机激励下,2 台发电机摇摆方程为

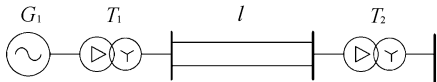


图 1 OMIB 系统
Fig. 1 One-machine infinite bus system

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + D_1 \frac{d\delta_1}{dt} = P_{m1} - P_e - P_{L1} \\ M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + D_2 \frac{d\delta_2}{dt} = P_{m2} + P_e - P_{L2} \end{cases} \quad (9)$$

引入假设对模型进行简化处理。

假设 1 (a) E' 恒定; (b) 忽略暂态凸极效应; (c) 机械功率恒定, 即 P_{m1}, P_{m2} 为常数, 并满足稳态条件:

$$\begin{cases} P_{m1} = P_{e,0} + P_{L1,0} \\ P_{m2} = -P_{e,0} + P_{L2,0} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{L1,0}$ ——第 1 台发电机所接负荷有功功率稳态值; $P_{L2,0}$ ——第 2 台发电机所接负荷有功功率稳态值。

定义:

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad \beta_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad \beta_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2}$$

根据定义, 式(9)经整理得

$$\begin{cases} M \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \beta_2 D_1 \frac{d\delta_1}{dt} = \beta_2 (P_{m1} - P_e - P_{L1}) \\ M \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \beta_1 D_2 \frac{d\delta_2}{dt} = \beta_1 (P_{m2} + P_e - P_{L2}) \end{cases} \quad (11)$$

假设 2

$$\beta_2 D_1 = \beta_1 D_2 = D$$

将式(11)中两式相减, 并且注意到 $\beta_2 + \beta_1 = 1$, 可得

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P'_m - P_e - P'_L \quad (12)$$

其中

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad P'_L = \beta_2 P_{L1} - \beta_1 P_{L2}$$

稳态时满足:

$$P'_m = P_{e,0} + P'_{L,0} \quad P'_{L,0} = \beta_2 P_{L1,0} - \beta_1 P_{L2,0} \quad (13)$$

假设 3 $P_{L1}(t), P_{L2}(t)$ 均为高斯随机过程, 其均值为其稳态值, 方差为定常时不变, 即对 $\forall t = \tau$, 满足 $P_{L1}(\tau) \sim N(P_{L1,0}, \sigma_1^2), P_{L2}(\tau) \sim N(P_{L2,0}, \sigma_2^2)$, 而且 P_{L1} 和 P_{L2} 互相独立, 所以 P'_L 也为高斯随机过程^[19]。令

$$\sigma^2 = \beta_2^2 \sigma_1^2 + \beta_1^2 \sigma_2^2 \quad (14)$$

则 $P'_L \sim N(P'_{L,0}, \sigma^2)$ 。

对式(11)做如下变换:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = (P'_m - P'_{L,0}) - P_e - (P'_L - P'_{L,0}) \quad (15)$$

根据假设 3, 不难证明 $\frac{(P'_L - P'_{L,0})}{\sigma} \sim N(0, 1)$, 即 $P'_L = P'_{L,0} + \sigma W(t)$ 。

另外根据稳态时功率平衡可知:

$$P_m = P'_m - P'_{L,0} = P_{e,0} = P_{\max} \sin(\delta_0 - \nu)$$

最终得

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_{\max} \sin(\delta_0 - \nu) - P_{\max} \sin(\delta - \nu) - \sigma W(t) \quad (16)$$

其中

$$D = \beta_2 D_1 = \beta_1 D_2 \quad \sigma = \sqrt{\beta_2^2 \sigma_1^2 + \beta_1^2 \sigma_2^2}$$

式(16)即为在一定的假设条件下两机电力系统的机电暂态过程随机模型。由此可见, 式(16)在形式上与 OMIB 系统机电暂态过程随机模型(式(8))相同。

3 多机电力系统机电暂态过程随机模型

多机电力系统是一个高阶、非线性系统, 加入随机性后模型更为复杂, 为此做一些简化假设。

假设 1 多机电力系统中有一个无穷大系统, 以该系统母线电压作为参考相量(参考坐标系)。如果不

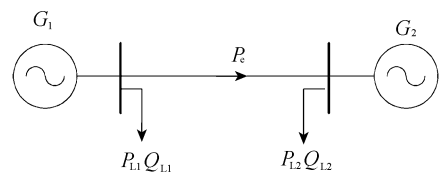


图 2 两机电力系统
Fig. 2 Two-machine power system

假设无穷大系统或者无穷大参考机,则方程奇异,这时需要假设某台参考机(有限容量),然后每台发电机方程与参考机方程相减,处理比较麻烦。

假设 2 (a) E' 恒定;(b) 忽略暂态凸极效应;(c) 机械功率恒定。

3.1 多机模型

在确定性情况下,第 i 台发电机摇摆方程为

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \tag{17}$$

电磁功率为

$$P_{ei} = E_i'^2 G_{ii} + E_i' \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j' Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \tag{18}$$

式中: G_{ii} ——节点 i 的自电导; Y_{ij} ——节点 i 与节点 j 之间的互导纳; α_{ij} ——节点 i 与节点 j 之间的阻抗角。
对于第 i 台发电机节点,其功率的随机波动可以反映在 P_{mi} 中;对于电动汽车等负荷的随机性,考虑到负荷可以表达为节点的并联导纳,所以负荷的随机性可以包含在式(18)第一项 G_{ii} 里,由于假设 E' 恒定,所以该功率正比于 G_{ii} ;对于可再生能源发电的功率波动,可以理解为节点注入功率,直接加入式(17)中。所以,上述随机激励可以近似表达为多个不同随机过程的叠加:

$$P_{Li} = \sum_k \sigma_{ik} W_{ik}(t) \tag{19}$$

式中: $W_{ik}(t)$, σ_{ik}^2 ——不同频率的标准高斯过程和方差,二者相互独立。高频分量一般对应于电动汽车等引起的随机功率波动,低频分量一般对应于风力发电等引起的随机功率波动。

对应于式(17)的随机微分方程为

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - P_{Li} \tag{20}$$

3.2 等效模型

根据 EEAC 理论,将发电机分为两群^[18],一群计为 S ,另一群计为 A ,定义

$$\begin{cases} \delta_s = \frac{\sum_{i \in S} M_i \delta_i}{\sum_{i \in S} M_i} & \delta_a = \frac{\sum_{j \in A} M_j \delta_j}{\sum_{j \in A} M_j} & M_s = \sum_{i \in S} M_i & M_a = \sum_{j \in A} M_j \\ P_{ms} = \sum_{i \in S} P_{mi} & P_{ma} = \sum_{j \in A} P_{mj} & P_{es} = \sum_{i \in S} P_{ei} & P_{ea} = \sum_{j \in A} P_{ej} & P_{Ls} = \sum_{i \in S} P_{Li} & P_{La} = \sum_{j \in A} P_{Lj} \end{cases} \tag{21}$$

假设 3 对于 S 群内的各台发电机近似地有

$$\frac{D_i}{M_i} = \frac{D_s}{M_s} \quad \forall i \in S \tag{22}$$

将式(20)中 S 群所有发电机的摇摆方程相加可得

$$\frac{d^2 \sum_{i \in S} M_i \delta_i}{dt^2} + \frac{D_s}{M_s} \frac{d \sum_{i \in S} M_i \delta_i}{dt} = \sum_{i \in S} P_{mi} - \sum_{i \in S} P_{ei} - \sum_{i \in S} P_{Li} \tag{23}$$

由式(21)可知

$$\sum_{i \in S} M_i \delta_i = M_s \delta_s$$

故可得

$$M_s \frac{d^2 \delta_s}{dt^2} + D_s \frac{d \delta_s}{dt} = P_{ms} - P_{es} - P_{Ls} \tag{24}$$

同理,可得 A 群等效发电机的转子运动方程。

综上所述,可得等效两机电力系统方程,只需将式(9)中下标 1 改为 s ,下标 2 改为 a :

$$\begin{cases} M_s \frac{d^2 \delta_s}{dt^2} + D_s \frac{d \delta_s}{dt} = P_{ms} - P_{es} - P_{Ls} \\ M_a \frac{d^2 \delta_a}{dt^2} + D_a \frac{d \delta_a}{dt} = P_{ma} + P_{ea} - P_{La} \end{cases} \tag{25}$$

类似两机电力系统机电暂态过程随机模型式(9),将式(25)变换为 OMIB 系统方程:

$$M\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2}+D\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=P'_\mathrm{m}-P_\mathrm{e}-P'_\mathrm{L}$$

(26)

$$P_\mathrm{e}=P_\mathrm{c}+P_\mathrm{max}\sin(\delta-\nu)$$

(27)

其中

$$\delta=\delta_\mathrm{s}-\delta_\mathrm{a}\quad M=\frac{M_\mathrm{s}M_\mathrm{a}}{M_\mathrm{s}+M_\mathrm{a}}\quad D=\beta_\mathrm{a}D_\mathrm{s}=\beta_\mathrm{s}D_\mathrm{a}$$

$$P'_\mathrm{m}=\beta_\mathrm{a}P_\mathrm{ms}-\beta_\mathrm{s}P_\mathrm{ma}\quad P'_\mathrm{L}=\beta_\mathrm{a}P_\mathrm{Ls}-\beta_\mathrm{s}P_\mathrm{La}$$

$$P_\mathrm{c}=\frac{M_\mathrm{a}\sum_{i,k\in S}g_{ik}\cos(\xi_i-\xi_k)-M_\mathrm{s}\sum_{j,l\in S}g_{il}\cos(\xi_j-\xi_l)}{M_\mathrm{s}+M_\mathrm{a}}\quad P_\mathrm{max}=\sqrt{C^2+F^2}\quad \nu=-\arctan\left(\frac{C}{F}\right)$$

$$\begin{cases} C=\sum_{i\in S}\sum_{j\in A}b_{ij}\sin(\xi_i-\xi_j)+\frac{M_\mathrm{a}-M_\mathrm{s}}{M_\mathrm{s}+M_\mathrm{a}}\sum_{i\in S}\sum_{j\in A}g_{ij}\cos(\xi_i-\xi_j) \\ F=\sum_{i\in S}\sum_{j\in A}b_{ij}\cos(\xi_i-\xi_j)+\frac{M_\mathrm{a}-M_\mathrm{s}}{M_\mathrm{s}+M_\mathrm{a}}\sum_{i\in S}\sum_{j\in A}g_{ij}\sin(\xi_i-\xi_j) \\ g_{ij}=E'_iE'_jY_{ij}\cos\alpha_{ij}\quad b_{ij}=E'_iE'_jY_{ij}\sin\alpha_{ij} \\ \xi_i=\delta_i-\delta_\mathrm{s}\quad (\forall i\in S)\quad \xi_j=\delta_j-\delta_\mathrm{a}\quad (\forall j\in A) \end{cases}$$

(28)

稳态时满足:

$$P'_\mathrm{m}=P_{\mathrm{e},0}+P'_{\mathrm{L},0}=P_\mathrm{c}+P_\mathrm{max}\sin(\delta_0-\nu)+P'_{\mathrm{L},0}$$

(29)

根据上述推导,总的等效随机激励是各个节点随机激励的线性组合,所以可以表达为多个随机过程的叠加:

$$P'_\mathrm{L}=P'_{\mathrm{L},0}+\sum_k\sigma_kW_k(t)$$

(30)

将式(27)(29)(30)代入式(26),最终可得

$$M\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2}+D\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=P_\mathrm{max}\sin(\delta_0-\nu)-P_\mathrm{max}\sin(\delta-\nu)-\sum_k\sigma_kW_k(t)$$

(31)

一般来说,式(31)中参数 P_max 和 ν 为时变参数。如果假设发电机群 S 和 A 中所有发电机同步,则 P_max 和 ν 为非时变参数。式(31)为在较强的假设条件下多机电力系统等效随机模型,在形式上与式(8)类似,只是随机激励变为多个。由此可见,多机系统机电暂态过程随机模型可以近似等效为 OMIB 系统里加入多个随机激励的模型。

理论上,多个互相独立的高斯随机过程经过线性叠加之后,依然是高斯随机过程。但是,实际计算中都是离散步长而不是连续时间,所以不同步长下离散型高斯随机过程的叠加就不一定是高斯随机过程。而且实际的随机激励并不是理想的高斯随机过程,其功率谱并不是理想的在所有频段都恒定,往往都是在一定宽度的频带上有一定程度变化,所以工程上还需要采用多个随机激励来计算。

4 仿真算例

式(31)中发电机参数取值为: $M=6283.1853(20\text{ s})$,
 $D=0.5,P_\mathrm{max}=2,\delta_0=40^\circ=0.6981317,\nu=6^\circ=0.1047198$ 。

计算步长 Δt 取 0.01 s ;同时施加 2 个随机激励,激励大小相等,即 $\sigma_1=\sigma_2=0.1$,其中一个频率高,即激励步长小, $\mathrm{d}t_1=0.01$,另一个频率低,即激励步长大, $\mathrm{d}t_2=0.1$ 。

根据式(31)仿真计算所得功角曲线如图 3 所示。可见在随机激励下,功角曲线呈现出有规律的振荡。为此,进一步分析功角曲线对应的频域功率谱(图4),可见功角曲线基本上是一个频率,其功率谱峰值频率 $f\approx 0.8\text{ Hz}$ 。

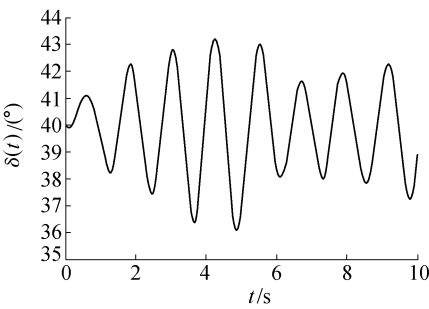


图3 随机激励下功角响应曲线

Fig. 3 Rotor angle curve under stochastic excitation

5 结 语

本文推导了随机激励下单机无穷大系统、两机系统和多机系统的机电暂态过程随机模型。在一般假设之下,多机系统机电暂态过程随机模型可以表达为各发电机摇摆方程右侧加入随机激励。在较强假设之下,多机系统机电暂态过程随机模型可以近似简化为单机无穷大系统下加入多个随机激励的等效模型。

仿真算例结果表明:(a)虽然输入的是随机激励,但功角曲线并非完全随机;(b)虽然输入的是不同频率的随机激励,但功角曲线基本是一个频率。

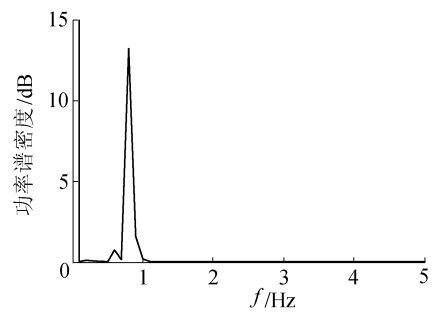


图 4 功角响应曲线对应的功率谱
Fig. 4 Power spectrum of rotor angle curve

参考文献:

[1] 高赐威,张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术,2011,35(2):127-131. (GAO Ciwei,ZHANG Liang. A survey of influence of electrics vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology,2011,35(2):127-131. (in Chinese))

[2] 邱妍,赵晋泉,朱永忠. 负荷随机扰动对电力系统电压稳定性的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):77-81. (QIU Yan,ZHAO Jinquan,ZHU Yongzhong. Effect of stochastic load disturbance on power system voltage stability based on bifurcation theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):77-81. (in Chinese))

[3] 肖焱,郭永基. 负荷随机扰动对电力系统电压稳定性的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2000,40(9):9-12. (XIAO Kai,GUO Yongji. Effects of stochastic load model on power system voltage stability[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2000,40(9):9-12. (in Chinese))

[4] 杜文娟,卜思齐,王海风. 考虑并网风电随机波动的电力系统小干扰概率稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(增刊1):7-11. (DU Wenjuan,BU Siqi,WANG Haifeng. Effect of stochastic variation of grid-connected wind generation on power system small-signal probabilistic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(Sup1):7-11 (in Chinese))

[5] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993.

[6] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.

[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.

[8] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York:Tata McGraw-Hill Education,1994.

[9] 鞠平,秦川,黄桦,等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6. (JU Ping,QIN Chuan,HUANG Hua,et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):1-6. (in Chinese))

[10] 朱位秋. 非线性随机动力学与控制研究进展及展望[J]. 世界科技研究与发展,2005,27(1):1-4. (ZHU Weiqiu. Recent developments in nonlinear stochastic dynamics and control[J]. World Sci-tech R & D,2005,27(1):1-4. (in Chinese))

[11] BILLINTON R, KURUGANTY P R S. A probabilistic index for transient stability[J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1980,99(1):195-206.

[12] 胡泽春,王锡凡,张显,等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):26-33. (HU Zechun,WANG Xifan,ZHANG Xian,et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):26-33. (in Chinese))

[13] 张海峰,高峰,吴江,等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术,2013,37(5):1298-1303. (ZHANG Haifeng,GAO Feng,WU Jiang,et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology,2013,37(5):1298-1303. (in Chinese))

[14] 侯学勇,鞠平,付红军. 基于两点估计法的电力系统静态电压稳定概率分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):347-352. (HOU Xueyong,JU Ping,FU Hongjun. Probabilistic analysis of static voltage stability in power systems based on two-point estimate method[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2010,38(3):347-352. (in Chinese))

[15] ZHANG Jianyong,JU Ping,YU Yiping,et al. Responses and stability of power system under small Gauss type random excitation [J]. Science China Technological Sciences,2012,55(7):1873-1880.

[16] CHEN Lincong,ZHU Weiqiu. First passage failure of dynamical power systems under random perturbations[J]. Science China Technological Sciences,2010,53(9):2495-2500.

[17] 鞠平,张建勇. 电力系统建模基本理论研究综述[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(1):4-12. (JU Ping,ZHANG Jianyong. Basic theory reviews of power system modeling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(1):4-12. (in Chinese))

[18] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999.

[19] 张炳根,赵玉芝. 科学与工程中的随机微分方程[M]. 北京:海洋出版社,1980.