

# 具有随机扰动抑制的同步发电机励磁控制器

彭云建<sup>†</sup>, 韩芳墨, 陈炯鸿, 邓飞其

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对单机无穷大发电系统机械功率与功率角的随机扰动对系统稳定性影响, 建立了暂态过程中励磁调节的随机非线性模型, 根据随机系统Lyapunov稳定性判据和随机非线性积分反推方法设计励磁控制律, 抑制系统的随机扰动以提高系统稳定性. 通过数值仿真实验验证了随机扰动抑制方法的正确性和有效性.

**关键词:** 单机无穷大电力系统; 随机扰动; 随机模型; 励磁控制器

**引用格式:** 彭云建, 韩芳墨, 陈炯鸿, 等. 具有随机扰动抑制的同步发电机励磁控制器. 控制理论与应用, 2018, 35(4): 438 – 446

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Synchronous generator excitation controller for random disturbance rejection

PENG Yun-jian<sup>†</sup>, HAN Fang-mo, CHEN Jiong-hong, DENG Fei-qi

(College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The paper considers the stability of a single-machine infinite bus (SMIB) power system which is disturbed by random fluctuation of a SMIB's mechanic power and power angle. And a stochastic nonlinear model is presented to describe the transient process of the excitation adjustment of SMIB. Based on the Lyapunov stability criterion of a stochastic nonlinear system and a technique, which has been named as Nonlinear Integral Backstepping, to design a stabilizer for such a system, a novel excitation control law is proposed to suppress random disturbance and improve the system's stabilization. The results of simulation show the correctness and validity of the presented excitation controller to suppress the random disturbance.

**Key words:** single-machine infinite bus power system; random disturbance; stochastic model; excitation controller

**Citation:** PENG Yunjian, HAN Fangmo, CHEN Jionghong, et al. Synchronous generator excitation controller for random disturbance rejection. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(4): 438 – 446

### 1 引言(Introduction)

电力系统在运行过程中受到多种随机因素的影响, 譬如, 负荷的随机波动、控制回路的信号噪声、随机短路故障等, 对电力系统的稳定运行带来不确定性的干扰. 1977年, Burchett首次在其博士论文中考虑了电力系统暂态稳定分析中的不确定因素, 其后, Billinton和Kuruganty研究了电力系统概率稳定性评估问题, 给出了基本概念、指标和方法<sup>[1]</sup>. 随着大规模互联电网与分散式新能源发电并网系统稳定性分析的需要, 概率稳定性研究在近十余年来成为了一个引人注目的领域, 也取得了很多的成果<sup>[2-8]</sup>. 文[7]基于拟哈密顿系统随机平均方法, 根据系统可靠性条件分析切除时间、阻尼系数及激励强度等对随机电力系统暂态稳定性的影响. 文[8]从数据驱动的角度, 利用随机矩阵理

论结合时间序列方法, 评估分析电网暂态稳定运行状态. 这类研究以概率统计为基础, 计算稳定性指标用以评估系统运行的可靠性与风险灵敏度. 而在电力系统动态调节(如励磁控制等)中概率指标只能作为控制性能的风险指标, 直接在控制器设计模型中考虑随机扰动的研究成果较少.

同步发电机励磁控制具有稳态情况下的电压调节器功能和动态情况下的系统稳定器功能, 是电力系统一类典型的控制问题. 目前励磁控制器设计方法包括PID调节<sup>[9]</sup>、电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)<sup>[10-12, 15]</sup>、线性最优控制(linear optimal excitation control, LOEC)<sup>[9-10]</sup>、非线性控制(nonlinear excitation control, NEC)<sup>[10]</sup>、鲁棒自适应控制<sup>[13-14]</sup>、神经网络控制<sup>[15]</sup>等, 这些励磁控制器设计方法主要基于

收稿日期: 2017-05-25; 录用日期: 2017-11-22.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: pengyj@scut.edu.cn; Tel.: +86 13760608082.

本文责任编辑: 刘允刚.

国家自然科学基金项目(61573154, 60904032), 广东省科技计划项目(2015A010106003)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(61573154, 60904032) and the Science & Technology Planning Project of Guangdong Province (2015A010106003).

电力系统线性或非线性模型, 针对不同的反馈变量, 应用线性或非线性系统控制理论方法来实现励磁控制律. 对于系统模型中存在的 uncertainty 问题, 或者出于将问题简化而忽略系统中 uncertainty 因素的影响, 或者将 uncertainty 部分建模为有界的 uncertainty 参数或未建模动态. 电力系统在随机扰动调整过程中可以观察到机械功率的随机振荡引起系统电压、频率或功率角的波动, 对系统稳定性具有破坏作用. 随机系统稳定性分析<sup>[18-19]</sup>与控制方法<sup>[20-23]</sup>的发展对这类电力系统控制问题提供了解决工具, 但此类控制律的研究成果还较少.

针对同步发电机在励磁调节过程中输入机械功率发生随机扰动时励磁控制律的设计问题, 根据系统功率扰动特点及其约束条件建立励磁控制器的随机扰动非线性模型, 分析了与Itô型随机动态系统模型的一致性, 然后基于反步法控制在电力系统的应用<sup>[13-14]</sup>, 采用随机非线性积分反推方法(backstepping)<sup>[18, 20]</sup>设计励磁控制器, 通过对数值仿真结果的分析, 验证了励磁控制律对抑制随机扰动的效果.

## 2 励磁控制系统随机非线性模型(Stochastic nonlinear model of excitation control system)

如图1所示单机-无穷大母线系统(SMIB), 考虑该系统在暂态过程中受到速度调节、电网负荷波动、机械扭振、阻尼系数变化等多种作用, 发电机的机械功率、转子转速与功率角发生随机振荡.

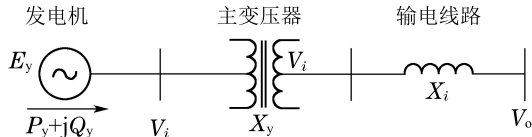


图1 单机无穷大母线(SMIB)系统示意图  
Fig. 1 Diagram of single machine infinite-bus (SMIB) system's structure

根据SMIB系统三阶非线性动态模型<sup>[9-10]</sup>, 建立不确定性模型

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s \omega_r + \Delta\delta, \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{M} (P_{ms} - D\omega_r - \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin(2\delta) + \Delta P_m), \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-\frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + E_{fds} + u_f), \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta$ 和 $\Delta\delta$ 分别为发电机功率角和功率角的扰动量(rad);  $\omega_r$ 为转子角速度 $\omega$ 与同步角速度 $\omega_s$ 的相对偏差(p.u.),  $\omega_s$ 为给定的同步角速度;  $P_{ms}$ 和 $\Delta P_m$ 分别为发

电机的稳态机械功率与功率扰动量(p.u.);  $E'_q$ 为发电机q轴暂态电势,  $V_s$ 为无穷大母线电压(p.u.);  $M$ 为发电机转子的转动惯量标么值(p.u.);  $X_d, X'_d, X_q, X'_q$ 分别为发电绕组的暂态阻抗d轴、q轴电抗参数;  $X_T, X_L$ 分别为输出变压器与线路阻抗(p.u.), 发电机与输电线路总阻抗为 $X_{d\Sigma} = X_d + X_T + X_L, X_{q\Sigma} = X_q + X_T + X_L, X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L$ .

考虑两类扰动 $\Delta\delta$ 和 $\Delta P_m$ 的随机模型如下:

1) 功率角扰动 $\Delta\delta$ . 定义功率角 $\delta$ 相对于稳态功率角 $\delta_s$ 偏移量为 $\hat{\delta} = \delta - \delta_s$ , 则功率角扰动用 $\hat{\delta}$ 相关的乘性噪声表示, 即

$$\Delta\delta = \zeta \hat{\delta} \frac{dW}{dt}, \quad (2)$$

式中:  $W$ 为维纳过程<sup>[18]</sup>,  $\zeta$ 为随机扰动强度.

2) 机械功率(或转子扭矩)扰动 $\Delta P_m$ . 根据机械功率与转子转速、机械扭矩的关系,  $\Delta P_m$ 由转子转速、跳变扭矩和扰动强度决定, 用与 $\omega_r$ 相关的乘性噪声表示, 即

$$\Delta P_m = P_\sigma \omega_r \frac{dT}{dt}, \quad (3)$$

式中:  $P_\sigma$ 为随机扰动强度,  $T$ 为机械随机扭振过程, 用维纳过程描述, 上述物理量的单位均为p.u.. 将式(2)-(3)代入式(1)得到SMIB系统的Itô型三阶随机非线性模型:

$$\begin{cases} d\delta = \omega_s \omega_r dt + \zeta \hat{\delta} dW, \\ d\omega_r = \frac{1}{M} (P_{ms} - D\omega_r - \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin(2\delta)) dt + \frac{P_\sigma \omega_r}{M} dT, \\ dE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-\frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + E_{fds} + u_f) dt, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $W$ 与 $T$ 为两个相互独立的维纳过程.

设

$$\begin{aligned} a &= \frac{D}{M}, \quad b = \frac{V_s}{X'_{d\Sigma}}, \\ c &= \frac{(X_q - X'_d) V_s^2}{2M(X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma})}, \quad p = \frac{X_{d\Sigma}}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}}, \\ q &= \frac{X_q - X'_d}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}}, \quad \tilde{E}_{fds} = \frac{E_{fds}}{T'_{d0}}, \\ \sigma &= \frac{P_\sigma}{M}, \quad \tilde{P}_{ms} = \frac{P_{ms}}{M}. \end{aligned}$$

设系统在无控制与无扰动时平衡点为 $(\sigma_s, \omega_{rs}, E'_{qs})$ , 则求解方程为

$$\begin{cases} \omega_s = 0, \\ \tilde{P}_{ms} = b E'_{qs} \sin \delta_s - c \sin(2\delta), \\ E_{fds} = p E'_{qs} - q \cos \delta_s, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $E_{\text{fds}}$ 表示系统稳态励磁量. 平衡点的值由方程(5)求解,也可以由电力系统的潮流方程求解<sup>[10]</sup>.

基于平衡点,定义系统状态量为

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3] = [\delta - \delta_s \ \omega_r - \omega_{rs} \ E'_q - E'_{qs}],$$

控制量 $u = \frac{1}{T'_{\text{do}}}u_f + \tilde{P}_{\text{ms}}$ ,式(4)简化为三阶Itô型随机微分方程:

$$\begin{cases} dx_1 = \omega_s x_2 dt + \zeta x_1 dW, \\ dx_2 = (-ax_2 - b(x_3 + E'_{qs}) \sin(x_1 + \delta_s) + \\ \quad c \sin 2(x_1 + \delta_s) + P_{\text{ms}})dt + \sigma x_2 dT, \\ dx_3 = (-p(x_3 + E'_{qs}) + q \cos(x_1 + \delta_s) + u)dt. \end{cases} \quad (6)$$

上式在平衡点 $(\sigma_s, 0, E'_{qs})$ 稳定域为

$$D_{\text{st}} = \{(\delta, \omega_r, E'_q) \mid |\delta| < \frac{\pi}{2}, \omega_r \in \mathbb{R}, E'_q \in (0, +\infty)\},$$

数值仿真结果表明,如果没有合适的控制律调节发电机励磁电压,系统受扰后是不稳定的.

### 3 随机非线性励磁控制律的设计(Method to design stochastic nonlinear excitation controller of power generator)

根据随机系统稳定判据设计系统镇定控制器的方法主要选择含有控制量的随机Lyapunov函数,基于系统稳定性条件导出控制律<sup>[18-19,21]</sup>.文献[20]针对严格反馈型非线性系统采用随机Backstepping方法,基于四次型Lyapunov函数设计状态反馈控制器使得闭环系统在平衡点依概率全局渐进稳定.系统(6)在模型结构上与文献[19-20,23]中随机系统相同,可以直接使用Backstepping方法设计系统的励磁控制律,实现有限时间内抑制随机干扰.将Itô型随机系统稳定性定义及基本定理引述如下:

对于Itô型随机微分系统

$$dx = f(x)dt + g(x)dw, \quad (7)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ , $w$ 是 $r$ 维相互独立的标准维纳过程,且定义在完备概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}_{t \geq 0}, \mathbb{P})$ , $f(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , $g(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times r}$ ,满足:

A1)

$$\begin{aligned} \|f(x) - f(y)\| &\leq \rho_1 \|x - y\|, \quad \rho_1 > 0, \\ \|g(x) - g(y)\| &\leq \rho_2 \|x - y\|, \\ \rho_2 &> 0, \quad y \in \mathbb{R}^n; \end{aligned}$$

A2)  $f(0) = 0, g(0) = 0, \|\cdot\|$ 表示范数.

上述条件保证了系统(7)对任意初始状态 $x_0$ 的解的存在性和唯一性,且原点为平衡点.

**定义1** 称系统(7)在平衡点 $x = 0$ 为依概率全局渐进稳定,则对初始时刻 $t_0$ 和初始状态 $x_0$ ,存在任意

小正数 $\epsilon > 0$ ,系统(7)的解满足

$$\lim_{x_0 \rightarrow 0} P\{\sup_{t \geq t_0} |x| > \epsilon\} = 0 \text{ 且 } P\{\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0\} = 1.$$

**定理1** 设 $x$ 是系统(7)的一个解过程,若存在正定和径向无界的随机函数 $V(x) \in C^2(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ ,且 $V_x = \frac{\partial V(x)}{\partial x}$ 连续, $V_{xx} = \frac{\partial^2 V(x)}{\partial x_i \partial x_j}$ 存在,其生成的Kolmogorov向后偏微分为

$$\mathcal{L}V(x) = V_x^T f(x) + \frac{1}{2} \text{Tr}(g^T(x) V_{xx} g(x)). \quad (8)$$

如果存在 $\mathcal{K}_\infty$ 类函数 $\zeta_1(\cdot) > 0$ 和 $\zeta_2(\cdot) > 0, \lambda > 0, 0 \leq \gamma < 1$ ,式(8)满足:

$$\text{B1)} \quad \zeta_1(x) \leq V(x) \leq \zeta_2(x),$$

$$\text{B2)} \quad \mathcal{L}V(x) \leq -\lambda V^\gamma(x),$$

则系统(7)是依概率全局渐进稳定<sup>[19-20,23]</sup>.

根据定理1,对系统(6)设计一类励磁控制器,当系统偏离某一平衡状态且在随机扰动下能够恢复到新的平衡状态 $(\delta_s, \omega_{rs}, E'_{qs})$ ,从而使发电机系统保持同步运行.针对系统结构具有严格反馈型特点,基于积分反推法(Backstepping)思想,设计随机非线性稳定控制律,有如下结论:

**定理2** 对于系统(6),存在 $\forall k_1$ 和 $k_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 > 0$ ,满足条件

$$\begin{cases} \xi k_1^2 - \omega_s k_1 + \frac{\zeta^2 \varepsilon_4^4}{4} k_2 + \tilde{\lambda}_1 = 0, \\ \xi k_1^2 + \omega_s k_1 - (1 - \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4}) k_2 + \tilde{\lambda}_2 + \lambda_2 = 0, \\ \omega_s k_1 - \frac{3}{2} \sigma (\zeta - \sigma) - a + \lambda_2 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

建立如下非线性励磁控制律:

$$u = \begin{cases} \frac{1}{b \sin \delta} \tilde{u}, & \sin \delta \neq 0, \\ E'_q, & \sin \delta = 0, \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\xi = \frac{4}{3} (\zeta - \sigma)^2,$$

$$\lambda_1 = \frac{3\omega_s \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} + \zeta^2 (6 + \varepsilon_3^2)}{4} + \lambda_1,$$

$$\tilde{\lambda}_2 = -a + \frac{\omega_s}{4\varepsilon_1^4} + \frac{3\varepsilon_2^{\frac{4}{3}}}{4} + \frac{3\sigma^2}{2},$$

$$\tilde{\lambda}_3 = \lambda_3 + \frac{1}{4\varepsilon_2^4} + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4},$$

$$\tilde{u} = k_1 k_2 (a - k_1) x_1 + (2c \cos 2\delta - b E'_q) \cos \delta)$$

$$\omega_s x_2 - b(p + a - k_1 + k_2) E'_q \sin \delta +$$

$$(a - k_1 + k_2) \tilde{P}_{\text{ms}},$$

则系统(6)在控制律 $u$ 作用下平衡点 $(\delta_s, \omega_{rs}, E'_{qs})$ 的邻域内依概率局部渐进稳定.

对于定理2, 根据系统(4)的实际发电参数, 选择合适参数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \lambda_1, \lambda_3 > 0$ , 满足式(9)解的存在性条件, 并求出 $k_1, k_2, \lambda_2$ , 代入到控制律(10)中, 得到一个励磁控制律。

### 3.1 推导随机励磁控制律的主要结果 (Main results of deriving the stochastic nonlinear excitation controller)

根据Backstepping方法, 设计系统(6)的“虚拟”控制器构成状态反馈闭环系统, 选择合适的随机Lyapunov函数, 使得系统在稳定平衡点邻域内依概率局部渐进稳定, 从而实现系统(6)在平衡点邻域内抑制随机扰动控制。根据系统(6)具有非线性反馈型特点, 构造“虚拟”控制系统的状态为

$$\begin{cases} z_1 = x_1, \\ z_2 = x_2 - \alpha_1(x_1), \\ z_3 = -bE'_q \sin \delta - \alpha_2(x_1, x_2). \end{cases} \quad (11)$$

选取 $\alpha_1(x_1) = -k_1x_1$ ,  $\alpha_2(x_1, x_2) = -k_2x_2 + \beta(x_1)$ ,  $k_1 \neq 0$ ,  $k_2 > 0$ 为待定参数,  $\beta(x_1)$ 为一类待定函数, 且满足 $\beta(0) = -c \sin 2\sigma_s - \tilde{P}_{ms} = -bE'_q \sin \sigma_s$ 。易验证,  $z = 0$ 当 $x = 0$ 时。

**第1步** 将 $x_2$ 作为功率角调节动态过程的输入量, 闭环控制子系统状态为 $z_1$ , 根据定理1选择随机Lyapunov函数 $V_1(z_1) = \frac{1}{4}z_1^4$ , 则根据式(8)得

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_1(z_1) &= \omega_s z_1^3 + \frac{3}{2}\zeta^2 x_1^2 z_1^2 = \\ &(\frac{3}{2}\zeta^2 - \omega_s k_1)z_1^4 + \omega_s z_1^3 z_2. \end{aligned} \quad (12)$$

**第2步** 将 $x_3$ 作为功率角与转速调节动态过程的控制量, 闭环控制子系统状态为 $[z_1 \ z_2]^T$ 。选择随机Lyapunov函数 $V_2(z_1, z_2) = V_1(z_1) + \frac{1}{4}z_2^4$ , 设 $\tilde{V}_2(z_2) = \frac{1}{4}z_2^4$ , 根据式(8)得

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\tilde{V}_2(z_2) &= \\ &[k_1 z_2^3 \ z_2^3] \begin{bmatrix} \omega_s x_2 \\ -ax_2 - bE'_q \sin \delta + \nu(\delta) \end{bmatrix} + \\ &\frac{1}{2}[\zeta x_1 \ \sigma x_2] \begin{bmatrix} 3z_2^2 k_1^2 & 3k_1 z_2^2 \\ 3k_1 z_2^2 & 3z_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta x_1 \\ \sigma x_2 \end{bmatrix} = \\ &k_1 \omega_s z_2^3 x_2 + z_2^3 (-ax_2 + z_3 - k_2 x_2 + \\ &\beta + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}) + \frac{3}{2}z_2^2 (k_1 \zeta x_1 + \\ &\sigma(z_2 - k_1 x_1))^2 z_2^3 (z_3 + (k_1 \omega_s - a - \\ &k_2) x_2 + \beta(x_1) + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}) + \\ &\frac{3}{2}z_2^2 (k_1 (\zeta - \sigma) x_1 + \sigma z_2)^2, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\nu(\delta) = c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}$ 。

**第3步** 以 $u$ 作为系统的控制量, 闭环控制子系统状态为 $z=[z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ , 选择Lyapunov函数为 $V_3(z_3) = V_2(z_1, z_2) + \frac{1}{4}z_3^4$ , 设 $\tilde{V}_3(z_3) = \frac{1}{4}z_3^4$ , 根据式(8)得

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\tilde{V}_3(z_3) &= z_3^3 ((-bE'_q \cos \delta - \beta x_1) \omega_s x_2 + \\ &k_1 f_2 - b f_3 \sin \delta) + \frac{1}{2}(\zeta x_1) 2(z_3 - k_2 x_2 + \\ &\beta(x_1) - \beta_{x_1 x_1}) = \\ &z_3^3 ((-bE'_q \cos \delta - \beta x_1) \omega_s x_2 + k_1 f_2 - \\ &b f_3 \sin \delta) + \frac{\zeta^2}{2} x_1 2 z_3 + x_1 2 (-z_2) + \\ &\frac{1}{2}(\zeta x_1) 2 (k_1 k_2 x_1 + \beta(x_1) - \beta_{x_1 x_1}), \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} \beta_{x_1} &= \frac{\partial \beta(x_1)}{\partial x_1}, \quad \beta_{x_1 x_1} = \frac{\partial^2 \beta(x_1)}{\partial x_1 \partial x_1}, \\ f(x) &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s x_2 \\ -ax_2 - bE'_q \sin \delta + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms} \\ -pE'_q + q \cos \delta + u \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

根据Kolmogorov向后偏微分线性运算关系 $\mathcal{L}V_3(z) = \mathcal{L}V_1(z_1) + \mathcal{L}\tilde{V}_2(z_2) + \mathcal{L}\tilde{V}_3(z_3)$ , 根据式(12)-(14)得

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\tilde{V}_3(z) &= (\frac{3}{2}\zeta^2 - \omega_s k_1) z_1^4 + \omega_s z_1^3 z_2 + z_2^3 (z_3 + \\ &(k_1 \omega_s - a - k_2) x_2 + \beta(x_1) + c \sin(2\delta) + \\ &\tilde{P}_{ms}) + \frac{3}{2}z_2^2 (k_1 (\zeta - \sigma) x_1 + \sigma z_2)^2 + \\ &z_3^3 (k_1 f_2 + (-bE'_q \cos \delta - \beta x_1) \omega_s x_2 - \\ &b f_3 \sin \delta) + \frac{\zeta^2}{2} z_1^2 z_3 + \frac{k_2 \zeta^2}{2} z_1^2 (-z_2) + \\ &\frac{1}{2}(\zeta x_1)^2 (k_1 k_2 x_1 + \beta(x_1) - \beta_{x_1 x_1}). \end{aligned}$$

根据Young's不等式<sup>[18]</sup>

$$xy \leq \frac{\varepsilon^p}{p} |x|^p + \frac{1}{q\varepsilon^q |y|^q}, \quad x, y \in \mathbb{R}, \quad \forall \varepsilon > 0,$$

得

$$\begin{aligned} z_1^3 z_2 &\leq \frac{3}{4} \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} z_1^4 + \frac{z_2^4}{4\varepsilon_1^4}, \quad z_1^3 z_2 \leq \frac{3}{4} \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} z_1^4 + \frac{z_2^4}{4\varepsilon_1^4}, \\ z_1^3 z_2 &\leq \frac{3}{4} \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} z_1^4 + \frac{z_2^4}{4\varepsilon_1^4}, \quad z_1^3 z_2 \leq \frac{3}{4} \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} z_1^4 + \frac{z_2^4}{4\varepsilon_1^4}, \\ \forall \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 &> 0. \end{aligned}$$

将不等式代入 $\mathcal{L}V_3(z)$ 算式得

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_3(z) &\leq (h_c(k_1) + \frac{\zeta^2}{4} (\varepsilon_3^2 + k_2 \varepsilon_4^2)) z_1^4 + z_2^3 (\frac{k_2 \zeta^2}{8\varepsilon_4^4} z_2 + \\ &(h_2(k_1) - k_2) x_2 + \beta(x_1) + h_1(k_1) x_1 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}) + z_3^3 \left( \frac{1}{4\varepsilon_2^4 + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_3^4}} z_3 - \right. \\
& \omega_s x_2 (bE'_q \cos \delta + \beta_{x_1}) + k_1 f_2 - \\
& \left. b f_3 \sin \delta \right) + \frac{1}{2} (\zeta x_1)^2 (k_1 k_2 x_1 + \beta(x_1) - \\
& \beta_{x_1 x_1}), \quad (15)
\end{aligned}$$

其中:

$$h_0(k_1) = \frac{3}{4} (\sigma - \zeta)^2 k_1^2 - \omega_s k_1 + \frac{3}{4} \omega_s \varepsilon_1^{\frac{4}{3}} + \frac{3}{2} \zeta^2, \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
h_1(k_1) = & \left( \frac{3}{4} (\sigma - \zeta)^2 k_1^2 + \frac{\omega_s}{4\varepsilon_1^4} + \frac{3}{4} \varepsilon_2^{\frac{3}{4}} + \frac{3}{2} \sigma^2 + \right. \\
& \left. 3\sigma(\zeta - \sigma) \right) k_1, \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_2(k_1) = & \frac{3}{4} (\sigma - \zeta)^2 k_1^2 + k_1 \omega_s + \frac{\omega_s}{4\varepsilon_1^4} + \\
& \frac{3}{4} \varepsilon_2^{\frac{3}{4}} + \frac{3}{2} \sigma^2 - a. \quad (18)
\end{aligned}$$

选择  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 > 0$  和如下条件等式:

$$h_0(k_1) + \frac{\zeta^2}{4} (\varepsilon_3^2 + k_2 \varepsilon_4^2) = -\lambda_1, \quad (19)$$

$$\frac{k_2 \zeta^2}{8\varepsilon_4^4} z_2 + (h_2(k_1) - k_2) x_2 + \beta(x_1) +$$

$$h_1(k_1) x_1 + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms} = -\lambda_2 z_2, \quad (20)$$

$$\left( \frac{1}{4\varepsilon_2^4} + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4} \right) z_3 - (bE'_q \cos \delta + \beta_{x_1}) \omega_s x_2 +$$

$$k_1 f_2 - b f_3 \sin \delta = -\lambda_3 z_3, \quad (21)$$

$$k_1 k_2 x_1 + \beta(x_1) - \beta_{x_1 x_2} = -\lambda_4, \quad (22)$$

根据式(20)得

$$\left( \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4} - 1 \right) k_2 + \lambda_2 + h_2(k_1) = 0, \quad (23)$$

$$\beta(x_1) + \tilde{h}_1 x_1 + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms} = 0. \quad (24)$$

由式(24)得  $\beta(x_1) = -\tilde{h}_1 x_1 - c \sin(2\delta) - \tilde{P}_{ms}$ , 其中  $\tilde{h}_1 =$

$\left( \frac{k_2 \zeta^2}{8\varepsilon_4^4} + \lambda_2 \right) k_1 + h_1(k_1)$ . 可见,  $\beta(x_1)$  满足式(11)条

件  $\beta(0) = -c \sin(2\sigma_s) - \tilde{P}_{ms}$ . 将式(24)代入式(22)得

$$(k_1 k_2 - \tilde{h}_1) x_1 - 5c \sin(2\delta) - \tilde{P}_{ms} + \lambda_4 = 0,$$

选择  $k_1 k_2 - \tilde{h}_1 = 0$ , 代入式(17)(23)得

$$\lambda_2 + k_1 \omega_s - \frac{3}{2} \sigma(\zeta - \sigma) - a = 0, \quad (25)$$

$$\lambda_4 = 5c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}. \quad (26)$$

根据系统(4)稳定域条件  $\delta \in (0, \frac{\pi}{2})$ , 可见,  $\lambda_4 >$

0. 根据式(19)–(25)的条件式得

$$\mathcal{L}V_3(z) \leq -\lambda_1 z_1^4 - \lambda_2 z_2^4 - \lambda_3 z_3^4 - \frac{\lambda_4 \zeta^2}{2} x_1^2.$$

选择  $\lambda = \min\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ , 则

$$\mathcal{L}V_3(z) \leq -4\lambda \left( \frac{z_1^4}{4} + \frac{z_2^4}{4} + \frac{z_3^4}{4} \right) \leq -4\lambda V_3(z)^{\frac{1}{2}}.$$

根据定理1, 闭环控制系统在式(19)–(25)对应的平衡点  $(\delta_s, \omega_{rs}, E'_{qs})$  下依概率局部渐近稳定, 从而系统(6)依概率局部渐近稳定. 根据稳定性条件式(19)–(25)可以确定反馈控制律.

证毕.

### 3.2 确定控制律参数 (Design parameters of the controller)

根据式(16)–(25)确定系统控制律参数, 可分两步求解:

1) 确定控制律参数  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, k_1, k_2$  的选择条件根据式(16)–(20)和式(25), 对应方程组(9), 即

$$\begin{cases} \xi k_1^2 - \omega_s k_1 + \frac{\zeta^2 \varepsilon_4^4}{4} k_2 + \tilde{\lambda}_1 = 0, \\ \xi k_1^2 + \omega_s k_1 - \left(1 - \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4}\right) k_2 + \tilde{\lambda}_2 + \lambda_2 = 0, \\ \omega_s k_1 - \frac{3}{2} \sigma(\zeta - \sigma) - a + \lambda_2 = 0. \end{cases}$$

选择合适的  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$ , 保证方程组(9)解存在, 且满足  $k_2 > 0$ . 根据系统扰动系数  $\zeta, \sigma$ , 分为如下两类情形:

a) 若  $\zeta \neq \sigma$ , 方程组解为

$$k_1 = \frac{\omega_s \pm \sqrt{\omega_s^2 - 4\tilde{a}\tilde{c}}}{2\tilde{a}},$$

$$k_2 = \frac{8\varepsilon_4^4 \left( \xi k_1^2 + \frac{\omega_s}{4\varepsilon_1^4} + \frac{3\varepsilon_2^{\frac{4}{3}}}{4} + \frac{3}{2} \zeta \sigma \right)}{8\varepsilon_4^4 - \zeta^2},$$

$$\lambda_2 = \frac{3}{2} \sigma(\zeta - \sigma) + a - \omega_s k_1,$$

其中:

$$\tilde{a} = \frac{((2\zeta^2 + 8)\varepsilon_4^4 - \zeta^2)(\zeta - \sigma)^2}{4(8\varepsilon_4^4 - \zeta^2)},$$

$$\begin{aligned} \tilde{c} = & \frac{2\zeta^2 \varepsilon_4^8}{8\varepsilon_4^4 - \zeta^2} \left( \frac{3}{2} \zeta \sigma + \frac{\omega_s}{4\varepsilon_1^4} + \frac{3\varepsilon_2^{\frac{4}{3}}}{4} \right) + \frac{3\omega_s \varepsilon_1^{\frac{4}{3}}}{4} + \\ & \frac{\zeta^2(6 + \varepsilon_3^2)}{4} + \lambda_1, \end{aligned}$$

其中:  $\varepsilon_4 > \frac{\sqrt[4]{2\zeta^2}}{2}$ ,  $\tilde{a}\tilde{c} \leq \frac{\omega_s^2}{4}$ .

b) 若  $\zeta = \sigma$  (即  $\xi = 0$ ), 则上述方程解为

$$k_1 = \frac{a - \lambda_2}{\omega_s},$$

$$k_2 = \frac{(2\omega_s + 6\varepsilon_1^4(\varepsilon_2^{\frac{4}{3}} + 2\sigma^2))\varepsilon_4^4}{(8\varepsilon_4^4 - \zeta^2)\varepsilon_1^4},$$

$$\varepsilon_4 > \frac{\sqrt[4]{2\zeta^2}}{2},$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = a - \eta,$$

且

$$a > \eta,$$

$$\eta = \frac{(\omega_s + 3\varepsilon_1^4(\varepsilon_2^3 + 2\sigma^2))\zeta^2\varepsilon_4^4 + 3\omega_s\varepsilon_1^4 + \zeta^2(6 + \varepsilon_3^2)}{2(8\varepsilon_4^4 - \zeta^2)\varepsilon_1^4} + \frac{3\omega_s\varepsilon_1^4 + \zeta^2(6 + \varepsilon_3^2)}{4}.$$

2) 根据式(21)和上式参数, 可以确定系统依概率稳定的控制律, 即

$$\begin{aligned} & -(\lambda_3 + \frac{1}{4\varepsilon_2^4} + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4})(bE'_q \sin \sigma - \\ & k_2x_2 - \tilde{h}_1x_1 - c \sin(2\delta) - \tilde{P}_{ms}) - \\ & (bE'_q \cos \delta - \tilde{h}_1 - 2c \cos(2\delta))\omega_sx_2 + \\ & k_2(-ax_2 - bE'_q \sin \delta + c \sin(2\delta) + \tilde{P}_{ms}) - \\ & b(-pE'_q + q \cos \delta + u) \sin \delta = 0. \end{aligned}$$

设  $\hat{u} = (b \sin \delta)u$ , 则

$$\begin{aligned} \tilde{u} = & \tilde{h}_1\tilde{\lambda}_3x_1 + (\tilde{h}_1\omega_s - ak_2 - b\omega_sE'_q \cos \delta + k_2\tilde{\lambda}_3 + \\ & 2c\omega_s \cos(2\delta))x_2 - (p + \tilde{\lambda}_3 + k_2)bE'_q \sin \delta + \\ & (\tilde{\lambda}_3c + ck_2 - \frac{1}{2}qb) \sin(2\delta) + (\tilde{\lambda}_3 + k_2)\tilde{P}_{ms}, \end{aligned} \quad (27)$$

其中  $\tilde{\lambda}_3 = \lambda_3 + \frac{1}{4\varepsilon_2^4} + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4}$ .

选择  $\lambda_3 = a - k_1 - \frac{1}{4\varepsilon_2^4 + \frac{\zeta^2}{8\varepsilon_4^4}}$ , 式(27)简化为

$$\begin{aligned} \tilde{u} = & k_1k_2(a - k_1)(\delta - \delta_s) + \\ & (2c \cos(2\delta) - bE'_q \cos \delta)\omega_s\omega_r - \\ & b(p + a - k_1 + k_2)E'_q \sin \delta + (a - \\ & k_1 + k_2)\tilde{P}_{ms}, \end{aligned}$$

则系统(6)对应的随机镇定控制律为

$$u = \begin{cases} \frac{1}{b \sin \delta} \hat{u}, & b \sin \delta \neq 0, \\ 0, & b \sin \delta = 0. \end{cases} \quad (28)$$

### 4 模拟仿真(Simulation)

根据文献[8, 10], 选择SMIB系统结构如图2所示, 其物理参数见表1. 根据励磁控制律(28)参数条件, 确定控制律参数见表2. 根据上述参数和式(28)可以计算控制律为

$$\begin{aligned} \hat{u} = & -16.1648\delta + (0.1192 \cos(2\delta) - \\ & 0.1833E'_q \cos \delta)\omega_r - \\ & 1.029E'_q \sin \delta - 20.0749. \end{aligned} \quad (29)$$

数值仿真时考虑两种初始扰动: 1) 设一条输电线路路上4 s发生短路, 4.5 s故障消失, 系统恢复到正常状态; 2) 汽轮机故障使得在4.5 s时机械功率永久下降30%. 两类扰动使系统进入到受励磁调节的暂态过程, 该过程中存在机械功率与功率角的随机扰动, 以模拟

维纳过程表示. 采用Itô型随机微分系统的数值解Euler-Maruyama(EM)方法, 求解系统(6)在闭环控制下的状态曲线.

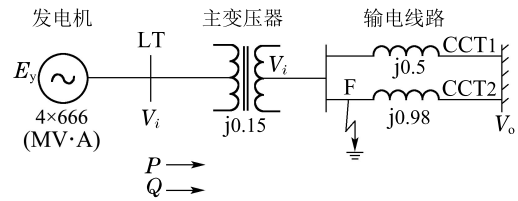


图2 SMIB仿真系统结构示意图

Fig. 2 Diagram of SMIB's simulation structure

表1 SMIB系统物理参数

Table 1 Electromechanical parameters of SMIB system' units

参数符号	参数值	参数符号	参数值/p.u.
$\omega_s$	1	$X_T$	0.15
$D$	0.1	$X_q$	1.76
$M$	7 s	$X_d$	1.8
$T'_{d0}$	8 s	$X'_d$	0.3
$V_s$	0.995	$X_{l1}$	0.5
$P_{m0}$	0.9	$X_{l2}$	0.93

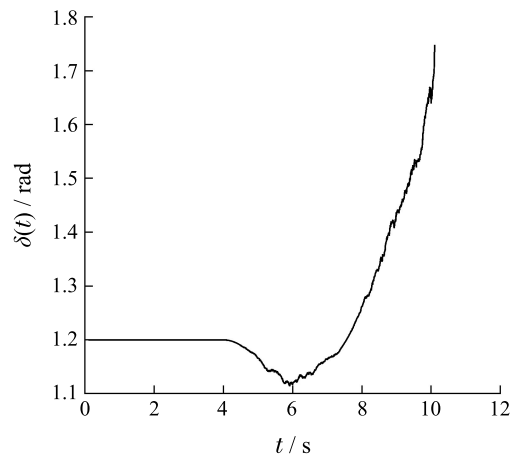
表2 随机励磁控制律的设计参数

Table 2 Parameters of stochastic nonlinear excitation controller

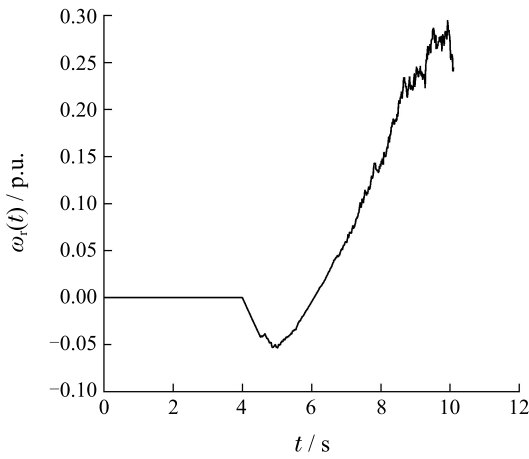
参数符号	参数值	参数符号	参数值
$P_\sigma$	7.4	$\lambda_1$	1.2
$\zeta_1$	0.8	$\lambda_2$	1.977
$\varepsilon_1$	0.8	$\lambda_3$	2.0744
$\varepsilon_2$	1	$\lambda_4$	0.13 0.38
$\varepsilon_3$	1	$k_1$	-2.37
$\varepsilon_4$	1.0733	$k_2$	2.86

1) 系统随机受扰的暂态过程仿真.

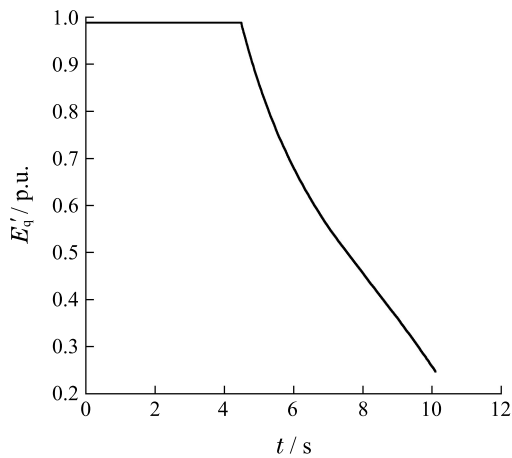
发生瞬时故障后无励磁控制下系统状态如图3所示.



(a) 功率角  $\delta(t)$  的样本曲线



(b) 转子角速度 $\omega_r(t)$ 的样本曲线

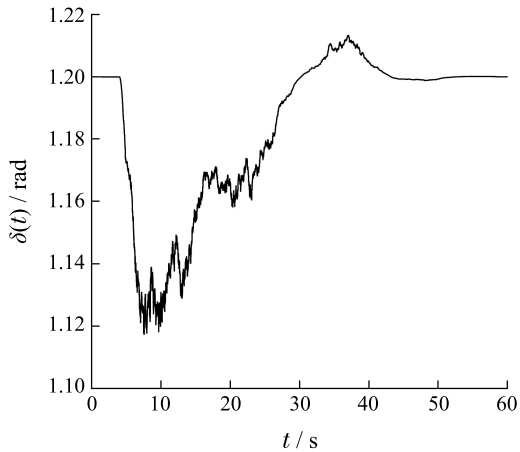


(c) 暂态电势 $E'_q$ 的样本曲线

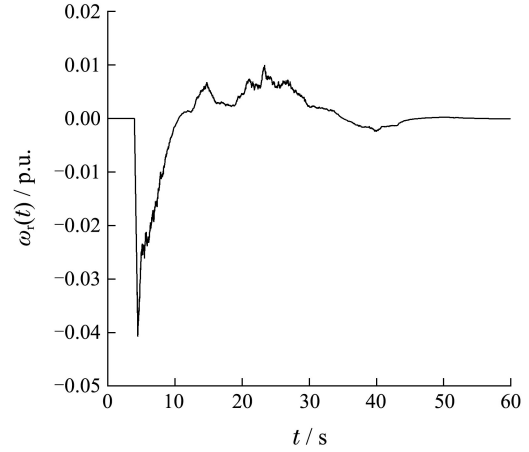
图3 发生瞬时短路故障时系统无励磁控制下状态样本曲线  
Fig. 3 Sample state-curves of SMIB system without excitation controller under transient short-circuit fault

仿真结果表明系统不稳定, 随机扰动使得系统的功率角与转子角速度发生了随机振荡, 增强了系统的不稳定性。

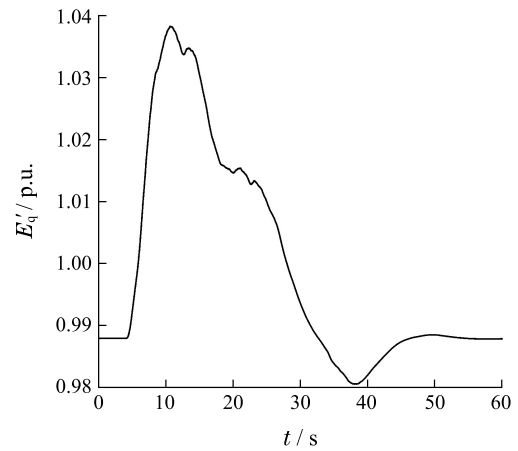
其次, 考虑情形(1), 系统在发生瞬时故障后随机非线性励磁控制调节, 系统状态曲线如图4所示。



(a) 功率角 $\delta(t)$ 的样本曲线



(b) 转子角速度 $\omega_r(t)$ 的样本曲线

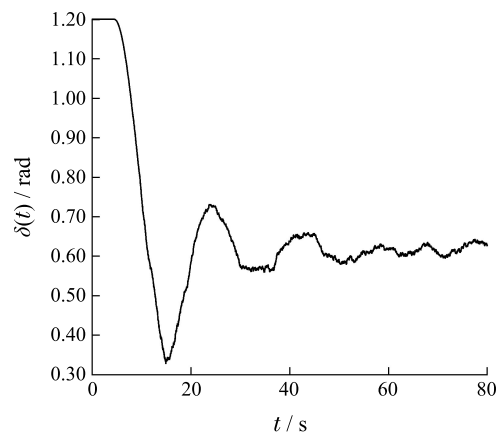


(c) 暂态电势 $E'_q$ 的样本曲线

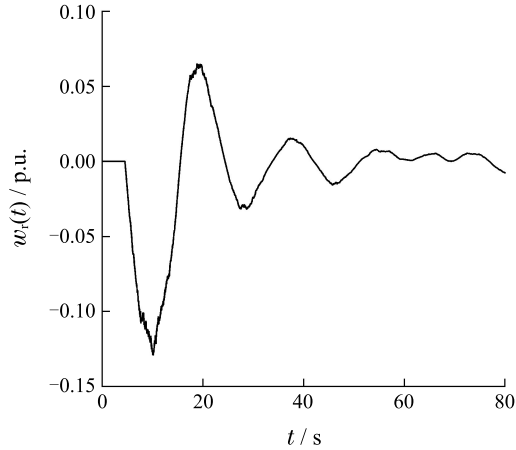
图4 发生瞬时短路故障后系统在控制 $u$ 作用下状态样本曲线  
Fig. 4 Sample state-curves of SMIB system with controller  $u$  under transient short-circuit fault

最后, 考虑情形(2), 即: 系统在发生机械功率永久下降后随机非线性励磁调节, 系统状态曲线如图5所示。

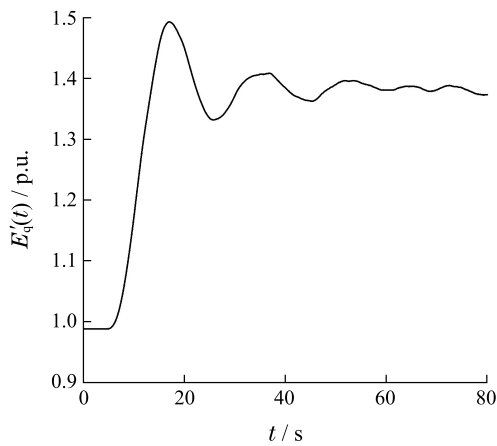
从上述仿真样本曲线可以看出, SMIB系统在发生大的扰动后受功率和功率角随机振荡进入随机暂态过程, 随机非线性励磁控制律能有效稳定系统, 对于不同类型和不同强度扰动, 励磁调节时间不一样。



(a) 功率角 $\delta(t)$ 的样本曲线



(b) 转子角速度 $\omega_r(t)$ 的样本曲线



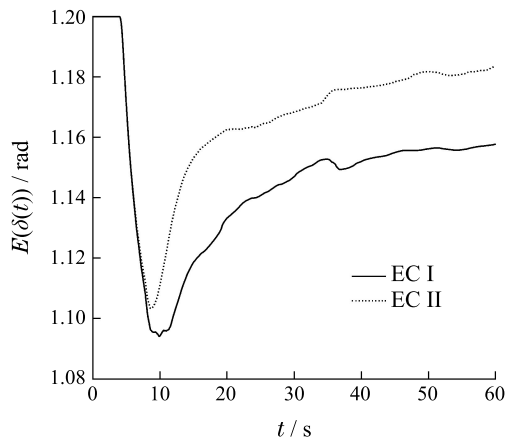
(c) 暂态电势 $E'_q$ 的样本曲线

图 5 发生机械功率永久下降时系统在控制 $u$ 作用下状态样本曲线

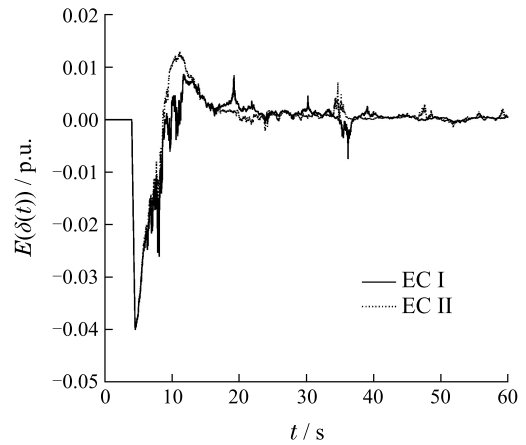
Fig. 5 Sample state-curves of SMIB system with controller  $u$  under permanent decrease in mechanical power

2) 控制律的比较.

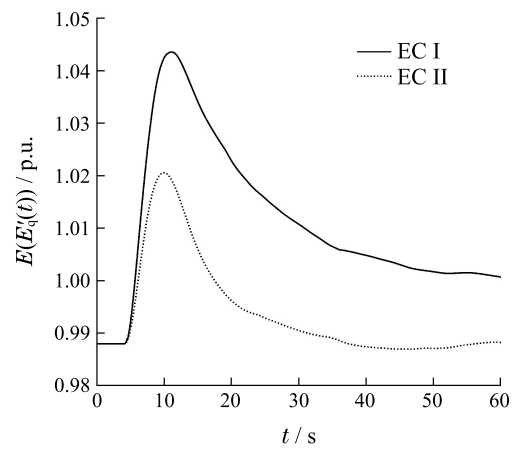
选择文献[10]中基于哈密顿函数设计的非线性励磁控制律,与本文方法进行比较,采用发生瞬时短路故障情形下励磁控制系统2500次模拟仿真的状态样本均值曲线,如图6所示.



(a) 功率角 $\delta(t)$ 的样本曲线



(b) 转子角速度 $\omega_r(t)$ 的样本曲线



(c) 暂态电势 $E'_q$ 的样本曲线

图 6 发生瞬时短路故障后系统在不同控制律作用下状态均值曲线

Fig. 6 Mean state-curves of SMIB system with different controllers under transient short-circuit fault

图中随机励磁控制系统和文献[10]的励磁控制系统状态均值曲线分别标注为(EC I)和(EC II),从均值曲线可以看出,本文提出的励磁控制器在抑制功率角和转速扰动上调节时间短、响应速度快、能够提高系统稳定性.

3) 控制有效性统计.

图4和图5仅给出了系统单次模拟的样本曲线,在多次(如3000次)仿真中,也存在系统控制失效的情况.因此,将系统稳定和不稳定情况进行了统计,计算出控制律的稳定概率(或可靠性),见表3所示.

表 3 控制律有效性统计

Table 3 Probability statistics of excitation controller's validity

初始扰动	控制律有效性统计结果		
	仿真总次数	稳定次数	稳定概率/%
瞬时短路故障	3000	2952	98.4
机械功率下降	3000	2934	97.8



注 表3中: 在随机动态系统中, 由于过程的随机不确定性, 仿真过程可以产生不同的时间序列样本, 因此, 统计结果不是唯一的, 当仿真次数很大时, 统计结果趋于一致。

## 5 结论(Conclusions)

电力系统暂态过程中功率角与输入功率等的随机扰动能够降低系统稳定性. 本文基于随机动态系统稳定性模型与控制方法分析了单机无穷大电力系统在随机扰动下的稳定问题, 建立了随机非线性模型. 其次, 设计了一类抑制随机干扰的励磁控制器, 仿真结果表明系统控制性能和可靠性明显提高, 验证了随机控制方法应用的正确性和有效性.

从随机励磁控制律结构可以看到, 这类控制律相对复杂, 基于随机系统稳定性条件, 推导中一些综合参数物理意义不太明确, 给控制器的实现带来新问题. 因此, 后续的研究将针对如何简化此类控制器, 改进控制器结构, 确保控制性能的条件使其易于工程实现.

## 参考文献(References):

- [1] BILLITON R, KURUGANTY P R S. A Probabilistic Index for Transient Stability [J]. *IEEE Transaction on Power Apparatus & Systems*, 1980, 99(1): 195 – 206.
- [2] WANG Kewen, XIE Zhitang, 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.  
(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.)
- [3] WANG Chengshan, YU Xuyang. Transient stability probability analysis method based on fitting curve [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(6): 5 – 9.  
(王成山, 余旭阳. 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(6): 5 – 9.)
- [4] CHEN P Y. *Stochastic modeling and analysis of power system with renewable generation* [D]. Denmark: Aalborg University, 2010.
- [5] PENG Yunjian, ZENG Jun, DENG Feiqi. A numeric method for stochastic transient stability analysis of excitation control system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(19): 60 – 66.  
(彭云建, 曾君, 邓飞其. 励磁控制系统随机暂态稳定性数值分析方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(19): 60 – 66.)
- [6] CUI Kai. *Study on probabilistic analysis and control of power systems transient stability* [D]. Tianjing: Tianjing University, 2016.  
(崔凯. 电力系统概率暂态稳定性分析与控制方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.)
- [7] ZHOU Haiqiang, JU Ping, XUE Yusheng, et al. Transient stability analysis of stochastic power system based on quasi-hamiltonian system theory [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(19): 9 – 14.  
(周海强, 鞠平, 薛禹胜, 等. 基于拟哈密顿理论的随机电力系统暂态稳定性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(19): 9 – 14.)
- [8] LIU Wei, ZHANG Dongxia, WANG Xinying, et al. Power system transient stability analysis based on random matrix theory [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(18): 4854 – 4863.  
(刘威, 张东霞, 王新迎, 等. 基于随机矩阵理论的电力系统暂态稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(18): 4854 – 4863.)
- [9] LIU Qu. *Stability Analysis of Power System and Its Generator Excitation Control* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.  
(刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.)
- [10] SUN Yuanzhang, JIAO Xiaohong, SHEN Tielong. *Nonlinear Robust Control for Power Systems* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.  
(孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.)
- [11] KUMAR A. Power system stabilizers design for multimachine power systems using local measurements [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 2163 – 2171.
- [12] SCARCIOTTI G. Low computational complexity model reduction of power systems with preservation of physical characteristics [J]. *IEEE Transaction on Power System*, 2017, 32(1): 743 – 752.
- [13] WU Jie, WANG Zhixin, WANG Guoqiang, et al. Backstepping control for voltage source converter-high voltage direct current grid side converter [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1408 – 1413.  
(吴杰, 王志新, 王国强, 等. 电压源型直流输电变流器系统中电网侧变流器的反步法控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(11): 1408 – 1413.)
- [14] YANG Junhua, CHEN Kaiyang, WANG Qiuqing, et al. Variable structure control of voltage source converter-high voltage direct current system based on backstepping [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1548 – 1554.  
(杨俊华, 陈凯阳, 王秋晶, 等. 电压源型高压直流输电系统的反步变结构控制 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(11): 1548 – 1554.)
- [15] MASROB M A, RAHMAN M A, IEEE L F, et al. Design of a neural network based power system stabilizer in reduced order power system [C] // *2017 IEEE the 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. Windsor, Canada: IEEE, 2017, 4: 1 – 6.
- [16] WANG S, LU S, ZHOU N, et al. Dynamic-feature extraction, attribution, and reconstruction (DEAR) method for power system model reduction [J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2014, 29(5): 2049 – 2059.
- [17] ZHU Z, GENG G, JIANG Q. Power system dynamic model reduction based on extended Krylov subspace method [J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2016, 31(6): 4483 – 4494.
- [18] MAO X R. *Stochastic Differential Equations and Their Applications* [M]. Chichester, UK: Ellis Horwood Publication, 2008.
- [19] YIN J, DING D, LIU Z, et al. Some properties of finite-time stable stochastic nonlinear systems [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2015, 259(C): 686 – 697.
- [20] DENG H, KRSTIĆ M. Stochastic nonlinear stabilization-I: a backstepping design [J]. *Systems & Control Letters*, 1997, 32(3): 143 – 150.
- [21] LIU S J, JIANG Z P, ZHANG J F. Global output-feedback stabilization for a class of stochastic non-minimum-phase nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2008, 44(8): 1944 – 1957.
- [22] LI W Q, JING Y W, ZHANG S Y. Adaptive state-feedback stabilization for a large class of high-order stochastic nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2011, 47(4): 819 – 828.
- [23] YIN J, KHOO S. Continuous finite-time state feedback stabilizers for some nonlinear stochastic systems [J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2015, 25(11): 1581 – 1600.

## 作者简介:

**彭云建** (1974–), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为随机系统建模与控制、电力系统分析与控制、信息系统工程, E-mail: pengyj@scut.edu.cn;

**韩芳墨** (1994–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制、分布式光伏发电并网控制技术, E-mail: 1127598565@qq.com;

**陈炯鸿** (1992–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为逆变器控制技术, E-mail: 501992313@qq.com;

**邓飞其** (1961–), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向随机系统稳定性分析与控制理论、系统工程, E-mail: aufqdeng@scut.edu.cn.