

汽轮发电机主汽门开度的非线性最优预测控制

蒋铁铮^{1,2}, 陈 陈¹, 艾 芊¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 长沙理工大学 电气工程学院, 湖南 长沙 410077)

摘要: 基于非线性最优预测控制理论, 提出了一种汽轮发电机主汽门开度非线性预测控制器的设计方法. 通过单机无穷大系统的建模分析, 导出具有闭型解析解的控制律, 避免了在线优化带来的大量计算负担, 从而满足实时控制的要求. 控制器的输入信号均选为发电机组的当地测量量, 便于工程实现. 仿真结果表明, 该控制器能有效地提高电力系统的暂态稳定及改善其动态品质.

关键词: 非线性系统; 预测控制; 汽轮发电机; 电力系统; 稳定性

中图分类号: TM712

文献标识码: A

Nonlinear optimal predictive controller for main steam valve of turbine generator

JIANG Tie-zheng^{1,2}, CHEN Chen¹, AI Qian¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410077, China)

Abstract: A nonlinear main steam valve controller of turbine generator is presented, on the basis of nonlinear optimal predictive control (NOPC) theory. Firstly, nonlinear optimal predictive control is briefly introduced based on the relative degree and control order of the controlled nonlinear systems. Secondly, the model is obtained for main steam valve, and control law with closed-form analytical solution is derived from the modeling analysis of the single machine infinite bus power system. The derived control law does not require on-line optimization, and huge calculation burden can be avoided. Thus the demand of real-time control can be satisfied. The input signals to the controller are all local measurements, so it is easy to implement in practice. Finally, simulation results are given to show that the controller can greatly enhance the transient stability and the dynamic performance of the power system.

Key words: nonlinear system; predictive control; turbine generator; power systems; stability

1 引言 (Introduction)

目前, 大型发电机都配备了电液转换器和微机调速器, 调速系统的灵敏度、线性度和间隙死区都有了很大的改善, 在调速系统中实施稳定控制策略已具备了良好的基础. 文[1]认为, 现代汽轮机“调速”系统对控制作用响应的快速性并不低于励磁系统, 在提高电力系统暂态稳定水平、抑制电力系统低频振荡方面, 采用原动机的水门开度或汽门开度的非线性控制往往更为有效. 因此, 研究与应用大型汽轮机汽门开度控制方案对于提高电力系统稳定水平有极重要的意义.

预测控制的滚动优化过程对于线性系统可以解析求解, 在线计算相当简便, 而对于非线性系统则往

往需要在线的数值迭代求解, 其繁重的计算量无法满足实时控制的要求^[2], 这也限制其在电力系统的广泛应用. 本文基于非线性最优预测控制理论, 设计了一种具有闭型解析解控制律的汽轮发电机主汽门控制器. 该控制器不要求进行在线优化计算, 避免了大量的计算负担, 因而它完全满足实时控制的要求.

2 非线性最优预测控制器的设计方法^[3] (Design method of nonlinear optimal predictive controller)

2.1 非线性预测控制 (Nonlinear predictive control)

考虑仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t), \\ y(t) = h(x(t)). \end{cases} \quad (1)$$

这里 $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $y = [y_1, \dots, y_m]^T \in \mathbb{R}^m$ 分别为状态矢量、控制矢量和输出矢量。

为了避免非线性最优控制需求解偏微分方程(PDEs)的困难,非线性最优预测控制采取一种滚动闭环优化控制算法,它是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用,以达到非线性系统(1)的输出 $y(t)$ 依据给定的性能指标最优地跟踪期望的参考轨线 $W(t)$ 。滚动优化算法^[4],即在任一时刻 t ,优化性能指标只涉及从该时刻起未来有限的时间 T 内,以 $x(t)$ 为初值,在输入 $\hat{u}(t+\tau)$ 的作用下状态矢量 $\hat{x}(t+\tau)$ 所对应的预测输出为 $\hat{y}(t+\tau)$,而到下一时刻,这一优化时段同时向前推移。因此,滚动优化性能指标可表示为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (\hat{y}(t+\tau) - \hat{W}(t+\tau))^T (\hat{y}(t+\tau) - \hat{W}(t+\tau)) d\tau. \quad (2)$$

这里: T 为滚动预测时间段, $\hat{y}(t+\tau)$ 为预测时间段的预测输出, $\hat{W}(t+\tau)$ 为预测时间段的期望轨线值, $\hat{u}(t+\tau)$ 为预测时间段的控制矢量。且对于非线性系统(1),作如下假设:

- 1) 零动态是稳定的;
- 2) 所有的状态变量是可用的;
- 3) 输出 $y(t)$ 与参考轨线 $W(t)$ 对时间 t 连续充分可微。

2.2 输出预测(Output prediction)

设非线性系统(1)的关系度^[5]为 ρ ,取控制阶 r (控制矢量 $u(t)$ 的 r 次导数),则在滚动时间段内,输出矢量 $\hat{y}(t+\tau)$ 至少由 Taylor 级数展开至 $\rho+r$ 阶,则输出 $\hat{y}(t)$ 对时间 t 的反复 $\rho+r$ 次微分可得到:

$$\hat{Y}(t) = \begin{bmatrix} \hat{y}^{[0]} \\ \hat{y}^{[1]} \\ \vdots \\ \hat{y}^{[\rho]} \\ \hat{y}^{[\rho+1]} \\ \vdots \\ \hat{y}^{[\rho+r]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f^1 h(x) \\ \vdots \\ L_f^\rho h(x) \\ L_f^{\rho+1} h(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho+r} h(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{m \times 1} \\ \mathbf{0}_{m \times 1} \\ \vdots \\ \mathbf{0}_{m \times 1} \\ H(\hat{u}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

这里 $H(\hat{u}) \in \mathbb{R}^{m(r+1)}$ 是一个关于 $\hat{u}(t), \dot{\hat{u}}(t), \dots, \hat{u}^{[r]}(t)$ 的函数

$$H(\hat{u}) =$$

$$\begin{bmatrix} L_g L_f^{\rho-1} h(x) \hat{u}(t) \\ P_{11}(\hat{u}(t), x(t)) + L_g L_f^{\rho-1} h(x) \dot{\hat{u}}(t) \\ \vdots \\ P_{r1}(\hat{u}(t), x(t)) + P_{r2}(\hat{u}(t), \dot{\hat{u}}(t), x(t)) + \\ \dots + P_{rn}(\hat{u}(t), \dots, \hat{u}^{[r-1]}(t), x(t)) + \\ L_g L_f^{\rho-1} h(x) \hat{u}^{[r]}(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\hat{u} = [\hat{u}(t)^T \quad \dot{\hat{u}}^T \quad \ddot{\hat{u}}^T \quad \hat{u}^{[r]}(t)^T]^T. \quad (5)$$

在滚动预测时间段内,任一时刻 τ 的输出 $\hat{y}(t+\tau)$ 可近似用 Taylor 级数表示为

$$\hat{y}(t+\tau) \cong \Gamma(\tau) \hat{Y}(t). \quad (6)$$

其中:

$$\Gamma(\tau) = \left[I \quad \bar{\tau} \cdots \frac{\bar{\tau}^{(\rho+r)}}{(\rho+r)!} \right], \quad \bar{\tau} = \text{diag}\{\tau, \dots, \tau\}, \quad (7)$$

$$\bar{\tau} \in \mathbb{R}^{m \times m}, \quad \Gamma(\tau) \in \mathbb{R}^{m \times m(\rho+r+1)}.$$

同理,在滚动预测时间段内,任一时刻 τ 的参考轨线 $W(t+\tau)$ 可近似用 Taylor 级数展开到 $\rho+r$ 阶,表示为

$$\hat{W}(t+\tau) = \Gamma(\tau) \bar{W}(t). \quad (8)$$

这里

$$\bar{W}(t) = [W(t)^T \quad \dot{W}(t)^T \quad \dots \quad W^{[\rho+r]}(t)^T]^T. \quad (9)$$

2.3 最优控制(Optimal control)

最优预测控制问题实际上可表述为:在任一时刻 t 给出最优的控制变量 $\hat{u}$ 以达到性能指标式(2)最小。由此,我们不难推导出仿射非线性系统(1)的最优预测控制律(见文[3]):

$$u(t) = -(L_g L_f^{\rho-1} h(x))^{-1} (K M_\rho + L_f^\rho h(x) - W^{[\rho]}(t)). \quad (10)$$

这里

$$M_\rho = \begin{bmatrix} h(x) - W(t) \\ L_f^1 h(x) - W^{[1]}(t) \\ \vdots \\ L_f^{\rho-1} h(x) - W^{[\rho-1]}(t) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m\rho}. \quad (11)$$

$K \in \mathbb{R}^{m \times m\rho}$ 由矩阵 $\bar{\Gamma}_\tau^{-1} \bar{\Gamma}_{\rho r}^T$ 的前 m 行确定,其中

$$\bar{\Gamma}_\tau = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{(\rho+1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho+1, \rho+r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{\Gamma}_{(\rho+r+1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho+r+1, \rho+r+1)} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\bar{\Gamma}_{\rho r} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{(1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(1, \rho+r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{\Gamma}_{(\rho, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho, \rho+r+1)} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\bar{T}_{(i,j)} = \frac{\bar{T}^{i+j-1}}{(i-1)!(j-1)!(i+j-1)}. \quad (14)$$

这里: $i, j = 1, \dots, \rho + r + 1, \bar{T} = \text{diag}\{T, \dots, T\} \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

3 系统数学模型及主汽门控制器的设计 (Model and design of controller for main steam valve)

3.1 系统模型^[1,6] (System model)

图1是一个简化的单机无穷大系统,假定:发电机采用经典的二阶模型,暂态电势 E'_q 恒定,其发电机转子运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \Delta\omega, \\ \Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{H}\Delta\omega + \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e). \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad (16)$$

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + \frac{1}{2}x_L. \quad (17)$$

式中: δ 为发电机功角(rad); $\Delta\omega$ 转子角速度增量(rad/s); $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为同步速度; P_e 为电磁功率; D 为阻尼系数; H 惯性时间常数(s).

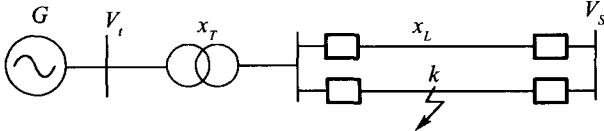


图1 单机无穷大系统等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of one machine infinite bus

对于中间再热式汽轮机,主要研究只有高压主汽门作为受控对象,假定中间调节门不参与调节,中低压缸输出的机械功率 P_{ML} 在动态过程中保持不变,即 $P_{ML} = P_{M10}$, 则汽轮机的动力学方程为^[1,6]:

$$\dot{P}_H = -\frac{1}{T_{H\Sigma}}P_H + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}}P_{m0} + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}}u, \quad (18)$$

$$P_m = P_H + P_{ML}, \quad (19)$$

$$P_H = C_H P_m, \quad (20)$$

$$P_{ML} = P_{M10} = C_{ML}P_{m0}. \quad (21)$$

这里: $T_{H\Sigma}$ 为汽门控制系统等效时间常数,约为0.4 s; C_H 为高压缸功率分配系数,约为0.3; C_{ML} 为中低压缸功率分配系数,约为0.7; P_{m0} 为机械功率初始值; u 汽门开度控制量.

3.2 基于非线性最优预测控制的主汽门开度控制器的设计 (Design of main steam valve controller based on NOPC)

将式(15)~(21)整理成仿射非线性系统的形式

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u. \quad (22)$$

其中:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ -\frac{D}{H}\Delta\omega + \frac{\omega_0}{H}P_H + \frac{\omega_0}{H}C_{ML}P_{m0} - \frac{\omega_0}{H}\frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}}\sin \delta \\ -\frac{1}{T_{H\Sigma}}P_H + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}}P_{m0} \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} \end{bmatrix}^T, x = [\delta \quad \Delta\omega \quad P_H]^T, u = u.$$

3.2.1 输出函数的选取 (Selection of output functions)

当电力系统由于故障或其它原因进入暂态过渡过程时,必然导致发电机转轴上的功率不平衡,即 $\Delta P_e \neq 0$, 使发电机处于加速或减速,即 $\Delta\omega \neq 0$, 导致发电机功角 δ 偏移,从而使系统失稳或振荡. 本文控制器的设计思想就是通过有效地控制汽轮机主汽门开度,调节机械输入功率 P_m , 使系统尽快达到稳态,即满足 $\Delta\omega = 0$, 以维持系统稳定. 因此,在非线性最优预测控制中,跟踪目标即参考轨线 $W(t)$ 可选定为转子相对电角速度 $\Delta\omega$, $\Delta\omega = 0$ 可设为预测控制中参考轨线的设定值. 则输出函数可由式(23)给出

$$y = h(x) = \Delta\omega. \quad (23)$$

3.2.2 主汽门开度控制器的设计 (Design of main steam valve controller)

由式(22)~(23)构成其仿射非线性方程,有

$$L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) = \frac{\omega_0}{H}P_H + \frac{\omega_0}{H}C_{ML}P_{m0} - \frac{D}{H}\Delta\omega - \frac{\omega_0}{H}\frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}}\sin \delta, \quad (24)$$

$$L_g h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) = 0, \quad (25)$$

$$L_f^2 h(x) = \frac{L_f h(x)}{\partial x} f(x) = -\frac{\omega_0 E'_q V_s}{H x'_{d\Sigma}} \Delta\omega \cos \delta - \frac{D\omega_0}{H^2}P_H - \frac{D\omega_0}{H^2}C_{ML}P_{m0} + \frac{D^2}{H^2}\Delta\omega + \frac{D\omega_0}{H^2}\frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}}\sin \delta - \frac{\omega_0}{H}\frac{1}{T_{H\Sigma}}P_H + \frac{\omega_0}{H}\frac{C_H}{T_{H\Sigma}}P_{m0}, \quad (26)$$

$$L_g L_f h(x) = \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} g(x) = \frac{\omega_0}{H}\frac{C_H}{T_{H\Sigma}} \neq 0. \quad (27)$$

根据文[5]不难求得关系度 $\rho = 2$. 由式(10)~(14),可给出非线性最优预测控制器的控制律:

$$u = -\frac{HT_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \left[KM_p + \frac{D\omega_0}{H^2} \frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}} \Delta\omega \cos \delta + \frac{D^2}{H^2} \Delta\omega - \left(\frac{D\omega_0}{H^2} + \frac{\omega_0}{HT_{H\Sigma}} \right) P_H + \left(\frac{\omega_0 C_H}{HT_{H\Sigma}} - \frac{D\omega_0}{H^2} C_{ML} \right) P_{m0} \right]. \quad (28)$$

其中, KM_p 由式(11) ~ (14) 确定, 若取控制阶 $r = 0$, 则

$$K = \left[\frac{10}{3T^2} \quad \frac{5}{2T} \right], \quad (29)$$

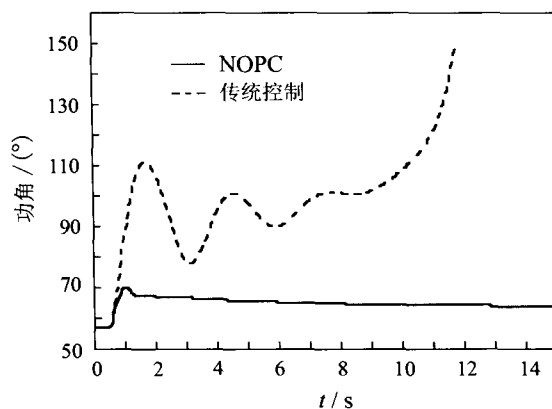
$$KM_p = \left(\frac{10}{3T^2} - \frac{5D}{2HT} \right) \Delta\omega - \frac{5\omega_0}{2HT} \frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{5\omega_0}{2HT} P_H + \frac{5\omega_0}{2HT} C_{ML} P_{m0}. \quad (30)$$

从所得控制律式(28)可知, 暂态电势 E'_q 的测量是难以实现的, 这就使得所设计的控制器式(28)难以在实际工程中得以实现, 考虑式(16), 则控制律式(28)可改写为

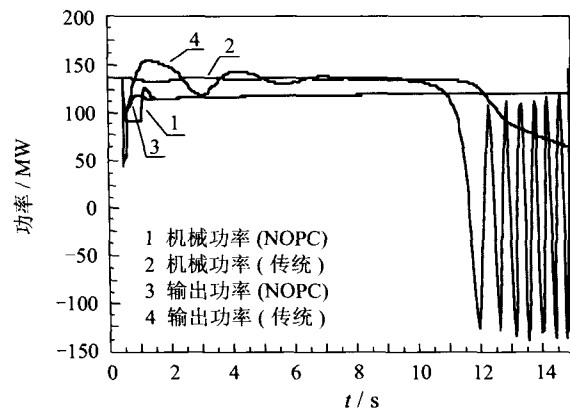
$$u = \frac{HT_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \left[\left(\frac{D\omega_0}{H^2} - \frac{5\omega_0}{2HT} \right) P_c - \frac{\omega_0}{H} P_c \Delta\omega \cot \delta + \left(\frac{D^2}{H^2} + \frac{10}{3T^2} - \frac{5D}{2HT} \right) \Delta\omega - \left(\frac{D\omega_0}{H^2} + \frac{\omega_0}{HT_{T\Sigma}} + \frac{5\omega_0}{2HT} \right) C_H P_m + \left(\frac{\omega_0 C_H}{HT_{H\Sigma}} - \frac{D\omega_0}{H^2} C_{ML} + \frac{5\omega_0}{2HT} C_{ML} \right) P_{m0} \right]. \quad (31)$$

式(31)表明, 所设计的控制器的所有输入信号均为本发电机组的当地测量量, 且与输电系统网络参数无关, 这一特性使控制器完全适应输电系统网络拓扑结构和参数的变化, 因而便于工程实现。

4 数值仿真(Numerical simulation)



(a) 功角曲线



(b) 机械功率与机端输出电功率曲线

图2 故障方式(1)的响应

Fig. 2 Response of case (1)

本文利用加拿大 Powertech Labs 公司的 TSAT 软件对图 1 所示的单机无穷大系统进行了仿真研究. 仿真系统的参数为(除注明单位外, 均为标么值):

发电机参数(基值: 235MVA, 18kV):

$$x_d = 1.863; x'_d = 0.257; T'_{d0} = 6.58 \text{ s};$$

$$H = 8.0 \text{ s}; D = 3.0$$

线路及变压器参数(基值: 100MVA, 500KV):

$$x_L = 0.4853; x_T = 0.127; \text{变比 } k_T = 1.14.$$

故障前系统工况: $P = 1.4, Q = 0.757, \delta_0 = 61.35^\circ$.

控制器的设计参数取为: 控制阶 $r = 0$, 预测时间 $t = 0.1 \text{ s}$.

故障方式为:

1) 永久性故障: 在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时, 系统在 k 点发生三相对地短路; $t = 0.65 \text{ s}$ 时, 故障线路被跳开;

2) 临时性故障: 在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时, 系统在 k 点发生三相对地短路; $t = 0.65 \text{ s}$ 时, 故障线路被跳开; $t = 1.8 \text{ s}$ 故障线路重合闸成功.

图 2, 图 3 给出了采用常规调节器^[6] 和采用非线性最优预测控制时分别在故障方式(1)(2)下系统的响应曲线.

从响应曲线可以得出: 在故障方式(1)的情况下, 由于故障线路被切除, 发电机与系统之间由双输电线路变成单输电线路, 线路传输功率稳定极限降低, 导致在传统汽门调节方式下系统失去稳定, 而在非线性最优预测控制方式下, 能较快地调节汽轮机的机械输出功率, 使发电机的输出功率由故障前的 140MW 调节到 125.25MW 稳定运行(图 2), 有效的提高了系统的暂态稳定; 故障方式(2)的响应曲线图 3 表明, 本文设计的控制器能使系统获得更好的动态品质.

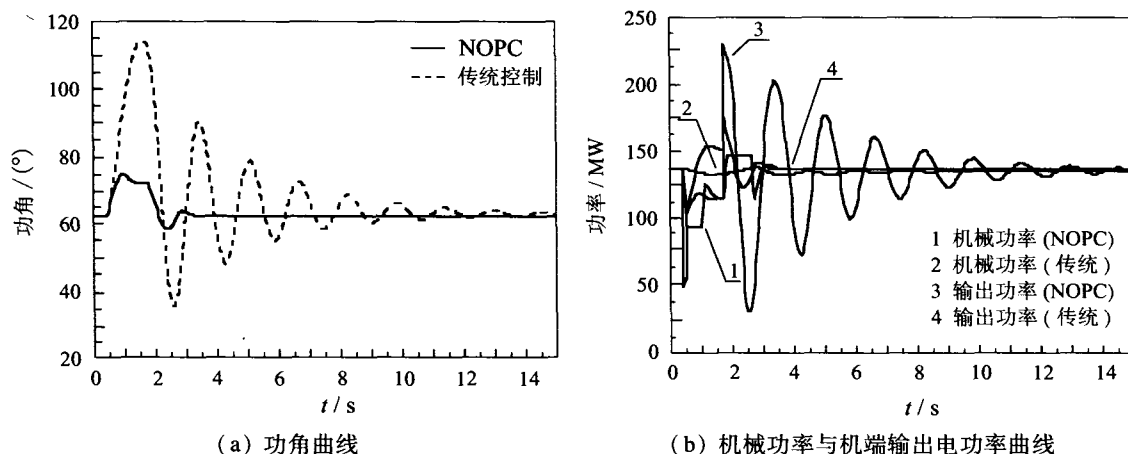


图3 故障方式(2)的响应

Fig. 3 Response of case (2)

5 结论(Conclusion)

以提高电力系统稳定性为目的,基于非线性最优预测控制理论,本文设计了具有闭型解析解控制律的汽轮发电机主汽门的控制器.该控制器不要求在线优化计算,避免了大量的计算负担,因而它完全满足实时控制的要求.不同故障方式下的仿真结果表明,该控制器能有效地提高电力系统的暂态稳定及获得更好的动态品质.

参考文献(References):

- [1] LU Q, SUN Y Z, MEI S W. *Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] 孙浩, 席裕庚, 张钟俊. 一类非线性系统的模型预测控制算法[J]. 上海交通大学学报. 1994, 28(4): 68-75.
(SUN Hao, XI Yugeng, ZHANG Zhongjun. Model predictive control algorithm for a class of nonlinear systems [J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 1994, 28(4): 68-75.)

- [3] WEN-HUA CHEN, DONALD J, BALANCE, et al. Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach [J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 633-641.
- [4] 王伟. 广义预测控制理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
(WANG Wei. *Generalized Predictive Control Theory and Its Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1998.)
- [5] ISIDORI A. *Nonlinear Control Systems: An Introduction* (3rd Edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [6] KUNDUR P. *Power System Stability and Control* [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

作者简介:

蒋铁铮 (1965—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向是电力系统稳定分析与非线性控制, E-mail: jiangtiezheng@sjtu.edu.cn;

陈 陈 (1938—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是电力系统稳定与控制, FACTS 技术与应用, E-mail: chchen@online.sh.cn;

艾 芊 (1969—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向是电力系统稳定分析与非线性控制, E-mail: aqian@sjtu.edu.cn.