

# 基于目标状态方程的非线性预测励磁控制器的设计

刘辉, 李啸骢, 韦化, 汪旒

(广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区南宁市 530004)

## THE DESIGN OF NONLINEAR PREDICTIVE EXCITATION CONTROLLER BASED ON TSE

LIU Hui, LI Xiao-cong, WEI Hua, WANG Ni

(Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** A novel scheme for the control design of nonlinear system is proposed in this paper. Defining the offsets between the state variables and their reference tracks as Target State Equations (TSEs) and using predictive control theory, a nonlinear predictive excitation control law is got for the single machine to infinite bus system. The closed-loop control system takes only the terminal voltage, active power and rotor angular speed of the generator as its feedback variables, so the proposed control can be easily realized. Simultaneously, the feedback system includes indirectly the future information of the tracking errors to improve the tracking speed and control effects. The results of simulation show that the scheme can solve more effectively the problem of the terminal voltage deviating, and can calm more effectively the mechanical oscillation of the generator than the nonlinear control method can do based on differential geometric method who takes the rotor angle or terminal voltage of the generator as the output function.

**KEY WORDS:** Power system; Nonlinear control; Predictive control; Excitation control; Target state equation (TSE)

**摘要:** 提出了一种新的非线性系统控制设计方法: 定义系统的状态变量与其参考轨迹之间的偏差为目标状态方程, 并以此状态方程为基础, 运用预测控制理论, 针对单机无穷大系统进行非线性预测控制设计, 得到了一种以机端电压、有功功率和角速度为反馈变量的非线性预测励磁控制规律。该控制规律包含了跟踪误差的未来信息, 以便提高跟踪速度和改善控制效果。仿真结果表明: 该方法不仅能有效地解决发电机机端电压静态偏移问题, 而且能很好地镇定发电机的机械

振荡, 比以功角偏差为输出函数和以机端电压偏差为输出函数的非线性微分几何控制法更有效、更易于实现。

**关键词:** 电力系统; 非线性控制; 预测控制; 励磁控制; 目标状态方程

## 1 引言

发电机励磁控制通常有 2 个目的: ①准确维持发电机机端电压在给定值上运行; ②改善电力系统的稳定性。实践已证明改善励磁控制规律能有效地改善系统运行的稳定性, 因此励磁控制的发展一直受到人们的关注, 并取得了丰硕的成果<sup>[1-14]</sup>。但无论是按机端电压偏差调节的常规励磁调节器, 电力系统稳定器 (PSS)<sup>[1]</sup>, 还是线性最优励磁控制器 (LOEC)<sup>[2]</sup>, 其励磁控制器的设计方法都是基于固定平衡点近似线性化的数学模型; 这种设计方法的缺点是当运行点偏移设计工作点及当系统发生大的干扰时, 控制器的性能就会受到影响而达不到预期的控制效果。近年来, 非线性控制方法在电力系统励磁控制中得到了运用, 但在非线性控制设计中, 输出函数的选择决定线性化状态空间的形成, 从而影响了控制的性能<sup>[3-11]</sup>, 因此输出函数的形式非常重要。其中大部分非线性控制器都是以功角稳定作为控制目标<sup>[4-8]</sup>, 虽然这种设计方法可将原非线性系统进行完全精确线性化, 但因它仅从提高电力系统稳定性出发, 而没有考虑电压调节精度要求, 因此当发电机的有功输出发生变化时, 发电机机端电压会发生静态偏移, 为此在非线性励磁控制研究中又提出了选取发电机机端电压偏差为输出函数的设计方案<sup>[9-10]</sup>。该设计方案确实有效地解决了发

基金项目: 国家自然科学基金编号 (50467001); 广西自然科学基金 (0448025)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50467001).

电机的机端电压静态偏移问题。但随之而来的问题是：由于设计中没有考虑如何在励磁控制过程中发挥励磁调节器的系统稳定器功能，故该设计方案不能很好地镇定发电机的机械振荡。为了协调系统的动态性能和静态特性，有效地解决静态偏移和抑制机械振荡，文[11]提出按多状态量线性组合的形式来选取输出函数，从而有效地解决了以往只重视按单状态量来选取输出函数所存在的缺陷。然而，多状态量输出函数的选取常依赖于设计人员的设计经验。选取不同内容的输出函数，就会使闭环控制系统获得不同的控制性能，增加了设计的困难。

为了解决上述问题，本文采用非线性预测控制理论直接从励磁控制的目标出发，定义有功功率、机端电压以及角速度和它们的参考轨迹之间的偏差为目标状态方程，并以此3个状态方程为基础进行非线性预测控制设计，从而避开了输出函数的选取问题。设计得到的非线性预测励磁控制规律不仅能有效地解决机端电压静态偏移问题，而且能保证功角和电压具有良好的动态特性和稳定性。

## 2 仿射非线性系统的预测控制

考虑如下的仿射非线性系统：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^m \mathbf{g}_i(\mathbf{X})u_i \\ \mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$  为状态向量； $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  与  $\mathbf{g}_i(\mathbf{X})$  为  $m$  维输出函数向量， $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  充分可微， $\mathbf{g}_i(\mathbf{X})$  只需一次可微， $i=1, \dots, m$ ； $u_i$  为控制量；记  $[u_1 \dots u_m]^T = \mathbf{U}(t)$ ； $\mathbf{h}(\mathbf{X})$  为  $n$  维函数向量。

**定义 1** 目标状态方程为

$$\dot{\mathbf{I}}_{\Delta} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_r \quad (2)$$

式中  $\mathbf{X}_r$  为式(1)中状态向量  $\mathbf{X}$  的参考轨迹。

**定义 2** 在式(1)所描述的系统中，如果  $\dot{x}_i$  中含有控制向量  $\mathbf{U}(t)$  的任意元素，则  $x_i$  的预测阶为 1；否则，取输出函数为  $f_i$ ，设该输出函数与式(1)的关系度为  $n_i$ ，则  $x_i$  的预测阶为  $n_i + 1$ ，记为  $r_i$ ，其中， $i=1, \dots, n$ 。

在定义 2 中， $n_i$  为系统和  $f_i$  (与每个状态量  $\dot{x}_i$  相对应的函数) 之间的关系度，它表明了每个状态量与控制量之间的关系， $f_i$  为  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  的第  $i$  个分量。

为了考察当前控制向量  $\mathbf{U}(t)$  对下一时刻状态量  $\mathbf{X}(t + \Delta t)$  ( $\Delta t > 0$ ) 的控制，将  $\mathbf{I}_{\Delta i}(t + \Delta t)$  在  $t$  处展开为  $r_i + 1$  阶的 Taylor 级数，从而将  $\mathbf{I}_{\Delta}(t + \Delta t)$  表示为

$\mathbf{U}(t)$  的矢量函数如下：

$$\mathbf{I}_{\Delta}(t + \Delta t) \approx \mathbf{I}_{\Delta}(t) + \mathbf{Y}(\mathbf{X}(t), \Delta t) + \mathbf{L}(\Delta t)\mathbf{W}(\mathbf{X}(t))\mathbf{U} - \mathbf{G}(\mathbf{X}_r, \Delta t) \quad (3)$$

式中  $\mathbf{Y}(\mathbf{X}(t), \Delta t) = [\mathbf{Y}_1(\mathbf{X}(t), \Delta t), \dots, \mathbf{Y}_n(\mathbf{X}(t), \Delta t)]^T$ ；

$$\mathbf{Y}_i = \Delta t x_i + \frac{(\Delta t)^2}{2!} L_f^0(f_i) + \dots + \frac{(\Delta t)^{r_i+1}}{(r_i+1)!} L_f^{r_i+1}(f_i)；$$

$\mathbf{I}_{\Delta}(t) = \int (\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) dt$   $\mathbf{L}(\Delta t) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为对角阵，其主对角线上的元素为  $L_{ii}(\Delta t) = (\Delta t)^{r_i+1} / (r_i+1)!$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ；

$L_f^k(f_i)$  表示  $f_i$  对  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  的  $k$  阶李导数，其中，

$$L_f^0(f_i) = f_i, L_f^1(f_i) = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{X}} f, \dots, L_f^n(f_i) = \frac{\partial L_f^{n-1}(f_i)}{\partial \mathbf{X}} f。$$

$\mathbf{W}(\mathbf{X}(t)) \in \mathbf{R}^{n \times m}$  的每一行以下列形式给出：

$$\begin{cases} \mathbf{W}_i = [g_{i1}, \dots, g_{im}], & r_i = 1 \\ \mathbf{W}_i = [L_{g_1}(L_f^{r_i-2}(f_i)), \dots, L_{g_m}(L_f^{r_i-2}(f_i))], & r_i \geq 2 \end{cases}$$

相对于  $\mathbf{g}_i$  的李导数定义为

$$L_{g_j}(L_f^{r_i-2}(f_i)) = \frac{\partial (L_f^{r_i-2}(f_i))}{\partial \mathbf{X}} g_j, \quad j=1, 2, \dots, m$$

$\mathbf{G}(\mathbf{X}_r, \Delta t) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$  的每一行以下列形式给出：

$$\mathbf{G}_i = [\Delta t x_{ri} + \frac{(\Delta t)^2}{2!} \dot{x}_{ri} + \dots + \frac{(\Delta t)^{r_i+1}}{(r_i+1)!} x_{ri}^{(r_i)}]$$

为找到当前适当的  $\mathbf{U}(t)$  以改善下一时刻的跟踪精度、惩罚  $t + \Delta t$  时刻的跟踪误差、逐点优化性能指标及达到精确跟踪，取当前的控制性能指标为

$$\mathbf{J}(\mathbf{U}(t)) = [\mathbf{I}_{\Delta}(t + \Delta t) - \mathbf{0}]^T \mathbf{Q} [\mathbf{I}_{\Delta}(t + \Delta t) - \mathbf{0}] / 2 + [\mathbf{U}(t) - \mathbf{U}^*]^T \mathbf{R} [\mathbf{U}(t) - \mathbf{U}^*] / 2 \quad (4)$$

式中  $\mathbf{U}^*$  为参考控制量； $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  是半正定的； $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{m \times m}$  是正定的。

将式(3)代入式(4)，可从  $\partial \mathbf{J} / \partial \mathbf{U}(t) = 0$  的表达式中求得使控制性能指标  $\mathbf{J}$  为最小的唯一控制如下：

$$\mathbf{U}(t) = \{[\mathbf{L}(\Delta t)\mathbf{W}(\mathbf{X}(t))]^T \mathbf{Q} \mathbf{L}(\Delta t)\mathbf{W}(\mathbf{X}(t)) + \mathbf{R}\}^{-1} \cdot$$

$$\{\mathbf{L}(\Delta t)\mathbf{W}[\mathbf{X}(t)]\}^T \mathbf{Q} [\mathbf{I}_{\Delta}(t) + \mathbf{Y} - \mathbf{G} - \mathbf{R}\mathbf{U}^*] \quad (5)$$

## 3 发电机非线性预测励磁控制设计

### 3.1 系统状态方程

发电机单机-无穷大系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{d} = (w-1)w_0 \\ \dot{w} = [P_m - P_e - D(w-1)] / T_J \\ \dot{E}_q' = -\frac{x_{d\Sigma}}{T_{d0}'x_{d\Sigma}} E_q' + \frac{(x_d - x_d')V_s \cos d}{T_{d0}'x_{d\Sigma}} + \frac{1}{T_{d0}'} E_f \end{cases} \quad (6)$$

式中  $d$ 、 $w$  和  $E'_q$  为状态量，分别表示发电机功角、发电机转子角速度和发电机交轴暂态电势； $E_f$  为控制量，表示发电机励磁电压； $V_s$  为无穷大母线电压； $P_m$  为机械输入功率； $D$  为发电机阻尼系数； $T'_{d0}$  为定子开路时的励磁绕组时间常数； $T_J$  为发电机的转子惯性时间常数； $x_d$  为发电机直轴电抗； $x'_d$  为发电机直轴暂态电抗； $x_q$  为发电机交轴电抗； $x_e$  为变压器和输电线路的总等效电抗； $x'_{d\Sigma} = x_d + x_e$ ， $x_{q\Sigma} = x_q + x_e$ 。式中除了  $d$  的单位为(rad)，时间常数  $T_J$  和  $T'_{d0}$  的单位为(s)外，其余均为标么值。

发电机输出的有功功率表达式为  $P_e = (E'_q V_s \sin d / x'_{d\Sigma}) + [V_s^2 (x'_d - x_q) / (2x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma})] \sin 2d$ ，将  $P_e$  相对时间求导，并整理为

$$\dot{P}_e = C_{p1} + C_{p2} E_f \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } C_{p1} &= [(w-1)w_0 \text{ctgd} - \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T'_{d0}}] P_e - \\ & (w-1)w_0 \frac{V_s^2 (x'_d - x_q) \cos^2 d}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + \frac{V_s^2 (x_d - x'_d) \sin 2d}{2(x'_{d\Sigma})^2 T'_{d0}} + \\ & \frac{(w-1)w_0 (x'_d - x_q) V_s^2 \cos 2d}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + (x'_d - x_q) \frac{x_{d\Sigma} V_s \sin 2d}{2x_{q\Sigma} T'_{d0} (x'_{d\Sigma})^2} \\ C_{p2} &= V_s \sin d / (x'_{d\Sigma} T'_{d0}) \end{aligned}$$

发电机机端电压表达式为

$$\begin{cases} V_t = \sqrt{V_{td}^2 + V_{tq}^2} \\ V_{td} = x_q V_s \sin d / x_{q\Sigma} \\ V_{tq} = [(x'_{d\Sigma} - x'_d) E'_q + x'_d V_s \cos d] / x'_{d\Sigma} \end{cases}$$

将  $V_t$  相对时间求导，并整理为

$$\dot{V}_t = C_{v1} + C_{v2} E_f \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } C_{v1} &= \frac{1}{V_t} \left\{ \left( \frac{x_q V_s \cos d}{x_{q\Sigma}} - \frac{x'_d V_s \sin d}{x'_{d\Sigma}} \right) (w-1)w_0 - \right. \\ & \frac{(x'_{d\Sigma} - x'_d) x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T'_{d0} V_s \sin d} P_e + (x'_{d\Sigma} - x'_d) x_{d\Sigma} \frac{(x'_d - x_q) V_s \cos d}{(x'_{d\Sigma})^2 x_{q\Sigma} T'_{d0}} + \\ & \left. \left[ (x'_{d\Sigma} - x'_d) (x_d - x'_d) / (x'_{d\Sigma})^2 T'_{d0} \right] V_s \cos d \right\}; \end{aligned}$$

$$C_{v2} = (x'_{d\Sigma} - x'_d) / (V_s x'_{d\Sigma} T'_{d0})$$

综合式(6)~(8)，可得  $[V_t, P_e, w]$  为状态变量的状态方程式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{X}(\mathbf{X}) + \mathbf{g}(\mathbf{X})u(t), \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(0) \\ \mathbf{X} = [V_t, P_e, w]^T, \quad \mathbf{X}_0 = [V_{t0}, P_{e0}, 1] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{X}) &= \begin{bmatrix} C_{v1} \\ C_{p1} \\ (P_m - P_e - D(w-1))/T_J \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} C_{v2} \\ C_{p2} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ u(t) &= E_f \end{aligned}$$

按照定义 1 有目标状态方程为

$$\begin{cases} \dot{I}_{\Delta 1} = V_t - V_r \\ \dot{I}_{\Delta 2} = P_e - P_r \\ \dot{I}_{\Delta 3} = w - w_r \end{cases} \quad (10)$$

式中  $V_r, P_r$  和  $w_r$  分别为机端电压、有功功率和角速度的参考轨迹。

### 3.2 预测方程

设预测方程的步长为  $\Delta t$ ，按照定义 2，对式(9)分别计算出  $V_t$ 、 $P_e$  和  $w$  的预测阶数依次为： $r_1 = 1$ ， $r_2 = 1$ ， $r_3 = 2$ 。并结合式(10)计算出式(3)的有关项为

$$\mathbf{y}(\mathbf{X}(t)) = \begin{bmatrix} \Delta t V_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} L_f^0(f_1) \\ \Delta t P_e + \frac{(\Delta t)^2}{2} L_f^0(f_2) \\ \Delta t w + \frac{(\Delta t)^2}{2} L_f^0(f_3) + \frac{(\Delta t)^3}{3!} L_f^1(f_3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{A}(\Delta t) = \text{diag}[(\Delta t)^2 / 2, (\Delta t)^2 / 2, (\Delta t)^3 / 6] \quad (12)$$

$$\mathbf{W}(\mathbf{X}(t)) = \begin{bmatrix} C_{v2} \\ C_{p2} \\ L_g L_f^0(f_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{v2} \\ C_{p2} \\ C_{v2} \partial f_3 / \partial V_t + C_{p2} \partial f_3 / \partial P_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中  $L_f^0(f_1) = C_{v1}$ ， $L_f^0(f_2) = C_{p1}$ ， $L_f^0(f_3) = f_3$

$$L_f^1(f_3) = \partial f_3 / \partial V_t + \partial f_3 / \partial P_e + \partial f_3 / \partial w$$

其中  $\frac{\partial f_3}{\partial V_t} = 0$ ， $\frac{\partial f_3}{\partial P_e} = -\frac{1}{T_J}$ ， $\frac{\partial f_3}{\partial w} = -\frac{D}{T_J}$ 。

因为每台发电机的工作点是由调度部门指定的运行曲线，与之相应的各输出状态量在一定的运行区间均为常量，因此有

$$\mathbf{X}_r(t + \Delta t) = \mathbf{X}_r(t) \quad (14)$$

分别取电压、有功功率和角速度的参考轨迹为机端电压给定值  $V_0$ 、有功功率给定值  $P_0$  和同步转速标么值 1，与此相对应的励磁控制器的参考控制量为  $E_f^*$ 。因此有

$$\begin{bmatrix} I_{\Delta 1}(t) \\ I_{\Delta 2}(t) \\ I_{\Delta 3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (V_t - V_0) dt \\ \int (P_e - P_0) dt \\ \int (w - 1) dt \end{bmatrix}, G(\mathbf{X}_r, \Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t V_0 \\ \Delta t P_0 \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.3 预测控制规律

选定误差矩阵  $\mathbf{Q} = \text{diag}[q_1, q_2, q_3]$  及控制权  $\mathbf{R}$ 。将式(11)~(13)和(15)代入式(5)，可得到预测控制规律为

$$\begin{aligned} E_f = & -\{-RE_f^* + [0.04138q_1(\Delta t)^2(I_{\Delta 1} + \Delta t(V_t - V_0) + \\ & (0.5(\Delta t)^2 - 0.1953P_e / \sin d) + (282.246 \cos d - \\ & 163.384 \sin d) \cdot (w - 1)] / V_t\} / V_t + 0.1724q_2 \sin d (\Delta t)^2 \cdot \\ & [I_{\Delta 2} + \Delta t(P_e - P_0) + 0.5(\Delta t)^2(-0.8138P_e + \\ & 314.2 \cos d(w - 1)P_e / \sin d + 495.264 \cos d^2(w - 1) - \\ & 495.264(1 - 2 \sin d^2) \cdot (w - 1)] - 0.014154q_3(\Delta t)^2 \cdot \\ & \sin d [I_{\Delta 3} + 0.166667(\Delta t)^3[-0.2463(-0.8138P_e + \\ & 314.2 \cos d(w - 1)P_e / \sin d + 495.264 \cos d^2(w - 1) - \\ & 495.264(1 - 2 \sin d^2) \cdot (w - 1)) - 0.4926(0.4926 + \\ & 0.2463P_0 - 0.2463P_e - 0.4926w)] + 0.5(\Delta t)^2 \cdot \\ & (0.4926 + 0.2463P_0 - 0.2463P_e - 0.4926w) + \\ & \Delta t(w - 1)] / [R + 0.0297218q_2 \sin d^2(\Delta t)^4 + \\ & 0.000200337q_3 \sin d^2(\Delta t)^6 + \\ & 0.0017123q_1(\Delta t)^4 / V_t^2] \end{aligned}$$

4 仿真结果

本文在单机无穷大系统模型上，针对下述3种方案对所提出的非线性预测励磁控制(NPEC)和非线性微分几何控制(NDGC)进行了仿真比较考查。NDGCR代表以功角偏差为输出函数的NDGC的仿真结果，NDGCV代表以机端电压偏差为输出函数的NDGC的仿真结果。仿真模型的有关参数为： $x_d = 2.12$ ； $x_q = 2.12$ ； $x_d' = 0.26$ ； $x_e = 0.24$ ； $D = 2$ ； $T_J = 4.06$ ； $T_{d0}' = 5.8$ 。式中：除了 $T_J$ 和 $T_{d0}'$ 的单位为(s)外，其余均为标么值。

(1) 有功功率调节扰动

在1s时有功功率给定值阶跃调高20%的情况下，系统有关状态量 $V_t, P_e$ 和 $w$ 的响应曲线如图1所示。由图1(a)看出，在有功调节扰动时，NDGCR产生了静态偏移，而NDGCV和NPEC均能保证发电机端电压不产生静态偏移。且NPEC收敛速度快，振荡次数少。由图1(d)可看出，NDGCV和NPEC

都能通过增大功角来实现有功功率的增加，而NDGCR由于对功角抑制太多，使得功角返回到了初始运行点，因此，为了增大有功出力，NDGCR只能抬高励磁电压，从而造成了机端电压偏离初始运行点，产生静态偏移。总之，图1说明：NPEC对于发电机电磁物理量和机械物理量的控制效果要明显优于NDGC的控制效果。

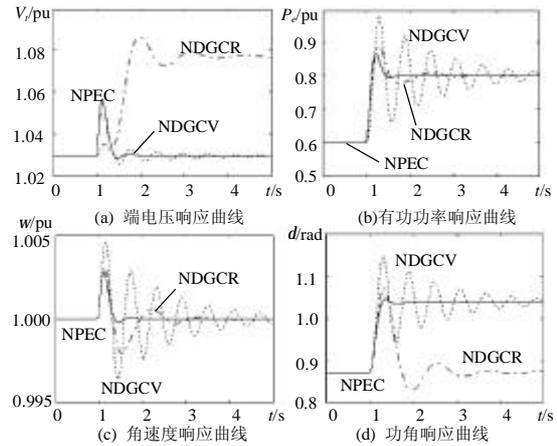


图1 原动机输入扰动时系统响应曲线  
Fig. 1 Responses of the system to disturbance of prime mover input

(2) 机端电压调节扰动

在1s时机端电压给定值阶跃调高到1.1(约7%)的情况下。系统有关状态量 $V_t, P_e$ 和 $w$ 的响应曲线如图2所示。由图2(a)可看出，NPEC可满足电压精确跟踪的要求。由图2(b)和(c)可看出，NPEC波动小，振荡次数少，收敛快。由图2(d)可看出，NPEC的功角稳定性比NDGCV好。由于在NDGCR的控制规律中不包含有电压的反馈量，故NDGCR不能参加电压调节仿真比较。

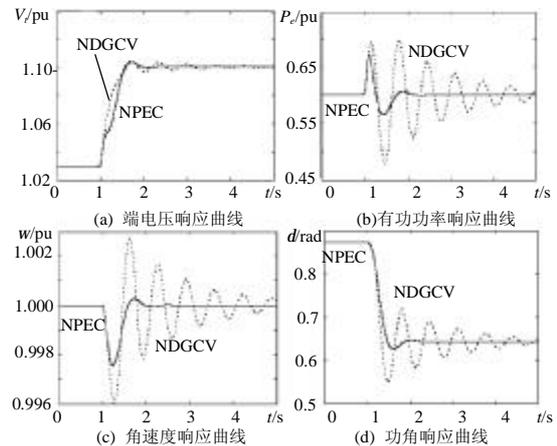


图2 调压扰动时系统响应曲线  
Fig. 2 Responses of the system to disturbance of voltage regulation

### (3) 发电机高压侧线路三相短路扰动

在 0.3s 时发生三相短路, 0.45s 时切除故障并重合闸成功的情况下, 系统有关状态量  $V_t$ ,  $P_e$  和  $w$  的响应曲线如图 3 所示。图 3 表明: 3 种控制方案都能够使系统返回初始运行点, 但 NDGCR 和 NPEC 有很接近的控制效果, 发电机的端电压和电磁功率在故障切除后能很快地恢复到故障前的运行状态, 并能很好地平息机组在暂态过程中的机械振荡, 控制效果明显优于 NDGCV 对应的控制效果。

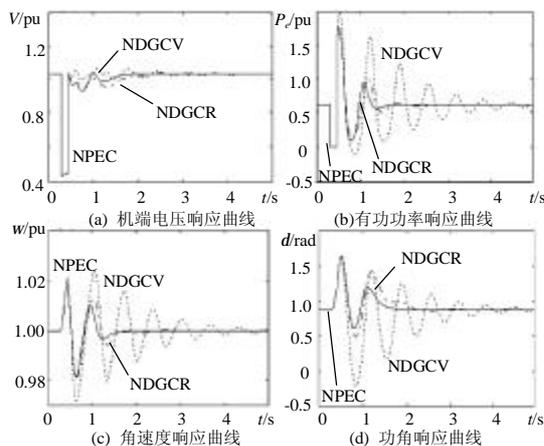


图 3 三相短路时系统响应曲线

Fig. 3 Responses of the system to disturbance of three-phase short circuit

## 5 结论

发电机在运行过程中主要关心的有 3 个输出量, 即: 机端电压  $V_t$ 、输出有功  $P_e$  和转速  $w$ 。本文提出通过定义发电机机端电压偏差、有功功率偏差和角速度偏差为目标状态方程, 并以此状态方程为基础, 运用预测控制理论的基本预测原理进行非线性预测励磁控制设计。研究表明: 该控制规律既能保证发电机在动态过程中具有良好的动态性能, 提高发电机运行的稳定性, 又能保证发电机在进入稳态时具有良好的静态性能, 不会因调功或调压而引起发电机端电压或有功功率对给定值的偏移。

## 参考文献

- [1] De Mello F P, Concordia C. Concept of synchronous machine stability as effected by excitation control[J]. IEEE Trans. PAS. 1969, 88: 316-329.
- [2] Yu Y N, Vongsuriya K, Wedman L N. Application of an optimal control theory to a power system[J]. IEEE Trans. PAS. Jan. 1970, 89: 55-62.
- [3] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 非线性励磁控制中输出函数对系统性能的影响[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 6-10.  
Li Xiacong, Cheng Shijie, Wei Hua *et al.* Influences of the output

- function on the system performances in nonlinear excitation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 6-10.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [5] 孙元章, 黎雄, 戴和平, 等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 332-336.  
Sun Yuanzhang, Li Xiong, Dai Heping *et al.* A nonlinear excitation controller to improve both power system stability and voltage regulation accuracy[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 332-336.
- [6] Mielczarski W, Zajackowski A M. Nonlinear field voltage control of a synchronous generator using feedback linearization[J]. Automatica. 1994, 30 (10): 1625-1630.
- [7] Nambu M, Ohsawa Y. Development of an advanced power system stabilizer using a strict linearization approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 813-818.
- [8] 周雪松, 马幼捷, 贾振江, 等. 微机非线性励磁控制的理论研究[J]. 中国电力, 1997, 30(3): 3-6.  
Zhou Xuesong, Ma Youjie, Jia Zhenjiang *et al.* Theoretical study on microcomputer based nonlinear excitation controller[J]. China Power, 1997, 30(3): 3-6.
- [9] Mak F K. Design of nonlinear generator excitors using differential geometric control theories[C]. Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control. Tucson. Arizona. 1992. 1149-1153.
- [10] 李啸骢, 颜卓胜, 韦化, 等. U 型非线性抗扰励磁控制规律设计[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 71-75.  
Li Xiacong, Yan Zhuosheng, Wei Hua *et al.* Anti-disturbance design of the nonlinear excitation regulator[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 71-75.
- [11] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.  
Li Xiacong, Cheng Shijie, Wei Hua *et al.* A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [12] 朱发国, 陈学允. 同步发电机的非线性 PID 励磁控制[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 47-50.  
Zhu Faguo, Chen Xueyun. Nonlinear PID excitation controller of synchronous generator[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 47-50.
- [13] 谢小荣, 韩英铎, 崔文进, 等. 多机电力系统中发电机励磁控制设计的数学模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 8-12.  
Xie Xiaorong, Han Yingduo, Cui Wenjin *et al.* Research on the mathematical model of excitation control design in multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 8-12.
- [14] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-163.  
Li Hui, Yang Shunchang, Liao Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-163.

收稿日期: 2005-03-08.

作者简介:

刘 辉(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统预测控制;  
李啸骢(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统非线性控制、电力系统预测控制;

韦 化(1954-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析计算、内点算法在电力系统中的应用、电力系统控制;

汪 旻(1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化应用。