

燃气轮机同步发电机励磁系统的最优与非线性控制

吴捷 杨苹 伍力

(华南理工大学电力学院·广州, 510641)

摘要: 本文针对燃气轮机组本身技术高速发展与其主要系统控制方式相对滞后这一矛盾, 将最优控制理论和非线性控制理论引入到燃气轮同步发电机的励磁控制系统中, 特别考虑了作为原动机的燃气轮机的特性, 提出了两种励磁控制策略: 最优励磁控制和非线性励磁控制. 通过分析与对比, 并针对某一具体系统给出了非线性励磁控制器的详细设计, 证明并特别指出该控制策略是可行和最佳的.

关键词: 燃气轮机; 励磁系统; 最优控制; 非线性控制

以往励磁系统的比例式调节控制方式, 在动态品质及稳定性方面早已显示出其弱点. 于是出现了“PID”励磁控制, 这种控制方式是在原有的控制量 $U = K_v \Delta V_t$ 的基础上加上 $K_d \frac{d\Delta V_t}{dt}$ 及 $K_i \int_0^t \Delta V_t dt$ 作为辅助控制量. 另外, 还有采用机端电压频率 f , 或机组转速 ω , 或发电机电磁功率 P_e 作为辅助输入量的控制方式, 称为“电力系统稳定器(PSS)”. 随着电力系统的发展, 燃气轮机组单机容量的增大, 这些基于经典控制理论的励磁控制方式已不能满足大电力系统对抑制振荡、提高动态稳定极限以及稳态电压调节精度等方面的要求. 近年来, 一些学者提出了利用最优控制理论、非线性控制理论等设计新型的励磁控制器, 并已取得很大进展. 本文在以上研究的基础上, 结合燃气轮机组的特点, 进行了最优励磁控制器和非线性励磁控制器的设计.

1 燃气轮机原动机及同步发电机的基本数学描述^[1]

为了将本文的主要工作放在励磁控制方式的研究上, 我们选取如图1所示的典型单机-无穷大系统作为研究对象. 其中, 燃气轮机同步发电机是隐极式发电机.

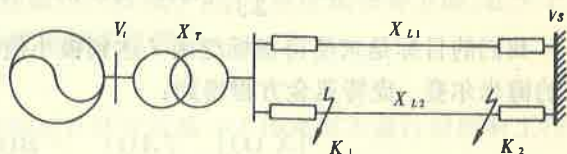


图1 单机-无穷大系统

1.1 燃气轮机原动机的运动方程

根据参考文献[2], 以燃料控制调节器的输出 θ_c 作为输入、以同步电机转速 N_g 为输出的燃气轮机线性化模型, 可用以下连续时间线性化方程表示:

$$G(s) = \frac{K e^{-T_d s}}{(s + P_1)(s + P_2)} = \frac{N_g}{\theta_c} (\text{rpm/deg}). \quad (1)$$

这里 K, P_1 和 P_2 是线性化增益, T_d 代表燃烧室的死区时间. 取采样时间 $t_s = 0.20$ 秒, 我们可以得到如下的离散时间传递函数, 即 z 变换方程:

$$W(z) = \frac{z^{-1}(a_1 + a_2 z^{-1})}{(1 - b_1 z^{-1})(1 - b_2^{-1} z^{-1})}. \quad (2)$$

1.2 同步发电机转子运动方程

$$\frac{H}{2\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D = P_m - P_e - \frac{D}{2\pi f_0} \frac{d\delta}{dt}. \quad (3)$$

这里转动惯量 H 的单位是秒, 发电机转子运行角 δ 的单位是弧度, 时间 t 的单位是秒, 机械功率 P_m , 电磁功率 P_e 和阻尼功率 P_D 用标么值, 单位是弧度², 机组阻尼系数 D 用标么值, 单位是弧度.

1.3 同步发电机输出功率方程

$$P_e = \frac{E_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin\delta. \quad (4)$$

$$Q_e = \frac{E_q V_s}{x_{d\Sigma}} \cos\delta - \frac{V_s^2}{x_{d\Sigma}}. \quad (5)$$

其中 E_q 为发电机空载电势, V_s 为无穷大母线电压, δ 为 E_q 与 V_s 两电压矢量间夹角, 与 E_q 矢量垂直的轴称为 d 轴, $x_{d\Sigma}$ 为发电机 d 轴同步电抗与发电机外部电抗之和.

显然方程(3)、(4)、(5)都是非线性微分方程.

1.4 同步发电机励磁绕组电磁动态方程

$$\dot{V}_f = E_q + T_{d0} \frac{dE_q'}{dt}. \quad (6)$$

其中, V_f 为励磁绕组电压, T_{d0} 为励磁绕组时间常数, E_q' 为发电机 d 轴暂态电抗 x_d' 后的瞬变电势.

2 最优控制器的设计与实现

2.1 线性最优控制系统的设计方法

线性系统状态空间方程的一般形式为:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t). \quad (7)$$

采用二次型性能指标:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [X(t)^T Q X(t) + U(t)^T R U(t)] dt = J_{\min}. \quad (8)$$

我们的目标是求得指标泛函 J 达到极小值的控制规律, 即最优控制规律. 这可根据解如下海米尔登 - 庞特里亚金方程得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{\Lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(t) & -B(t)R^{-1}B^T(t) \\ -Q & -A^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ \Lambda(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中

$$\Lambda(t) = P(t)X(t), \quad (10)$$

解得最优控制规律为:

$$U^*(t) = -R^{-1}B^T(t)P(t)X(t). \quad (11)$$

其中 $P(t)$ 为黎卡提方程的解.

2.2 励磁系统最优控制器的设计

设图 1 中系统参数如下: $P_N = 60.0$, $\cos\varphi = 0.85$, $V_s = 1.0$, $\omega_0 = 314.16$, $x_d = 2.543$, $x_q = 2.543$, $x_d' = 0.318$, $D = 5.0$, $H = 8.0$, $T_{d0} = 10$, $x_T = 0.1$, $x_L = 0.73$, 工作点选为: $P_{e0} = 0.5$, $\delta_0 = 1.0$, $P_{m0} = 0.5$, $V_{f0} = 1.0$ (以上以标么值为主). 其中, x_d 表示发电机 d 轴电抗, x_q 为 q 轴电抗, x_T 为主变压器电抗, x_L 为线路电抗, ω 为转子运动角频率.

对发电机的基本方程进行偏差化和线性化, 并代入以上数据, 得到系统的状态空间方程:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t). \quad (12)$$

其中, 状态变量为 $X(t) = [\Delta P_e \quad \Delta\omega \quad \Delta V_s]^T$, 输入变量为 $U(t) = \Delta E_f$, 系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -0.216 & 0.689 & -0.125 \\ -39.27 & -0.625 & 0 \\ -1.34 & 0.000609 & -0.0776 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.0818 \\ 0 \\ 0.0508 \end{bmatrix}.$$

由于系统(12)能控,则黎卡提方程存在唯一真解.我们选定二次型性能指标中的加权矩阵 Q 为 3×3 对角阵: $Q = \text{diag}[1 \ 100 \ 1000]$, $R = r = 1$,解黎卡提方程可得

$$P = \begin{bmatrix} 1078.55 & -18.6838 & -1033.8 \\ -18.6838 & 25.5662 & -97.7211 \\ -1033.8 & -97.7211 & 3604.62 \end{bmatrix}.$$

则最优控制规律为

$$U^*(t) = -R^{-1}B^TPX(t) = -B^TPX(t) = [-35.7704 \ 6.49 \ -98.4826]X(t).$$

2.3 仿真分析

选取系统(12)的常规控制 $U(t) = K'\Delta V_t$ 的系数 $K' = 20$,分别对系统在常规控制方式和最优控制方式下的动态过程进行仿真.图2是这两种控制方式下的功角特性曲线;图3显示了在微小干扰($\Delta P_m = 0.05$)作用后,系统(12)分别是在这两种控制方式下的动态过程;图4显示了一回远距离输电线路发生三相瞬时性短路故障(0秒短路——0.15秒切除故障回路——0.75秒故障线路重合成功)时,系统(12)分别是在这两种控制方式下的动态过程.曲线1表示常规控制,曲线2表示最优控制(下同).

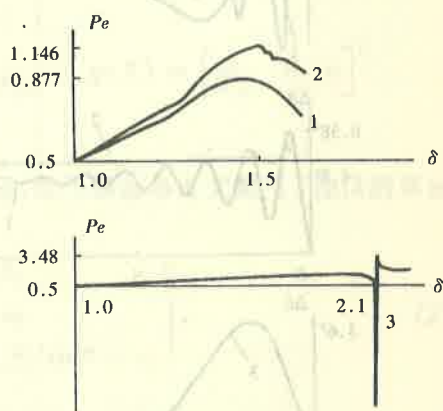


图2 功角特性曲线

仿真结果显示:在最优控制方式下,系统的 P_e - δ 稳定极限较常规比例控制有显著提高;系统在小干扰作用下的响应也较常规比例控制好,主要体现在振荡次数减少,反应速度加快等方面;在大干扰发生时,最优控制提供了较好的阻尼,所以系统振荡平息较快.

3 非线性控制器的设计与实现

由于发电机组的非线性特性,最优励磁控制只是针对某一工作点而不是针对所有工作点的最优,所以有必要从非线性控制的角度去考虑励磁系统的控制.

3.1 状态反馈精确线性化的设计原理

电力系统属于仿射非线性系统.一个单输入单输出的仿射非线性系统,其状态空间描述如下:

$$\dot{X}(t) = f(X(t)) + g(X(t))U(t), \quad (13)$$

$$Y(t) = h(X(t)). \quad (14)$$

这里, $X(t) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量; $U(t) \in \mathbb{R}^1$ 为控制量; $Y(t) \in \mathbb{R}^1$ 为输出量; $f(x)$ 与 $g(x)$ 为状态空间的 n 维函数向量场; $h(x)$ 为 x 的标量函数.

如果系统的关系度 $r = n$,则选择如下的坐标映射:

$$Z = \varphi(X) = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(x) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

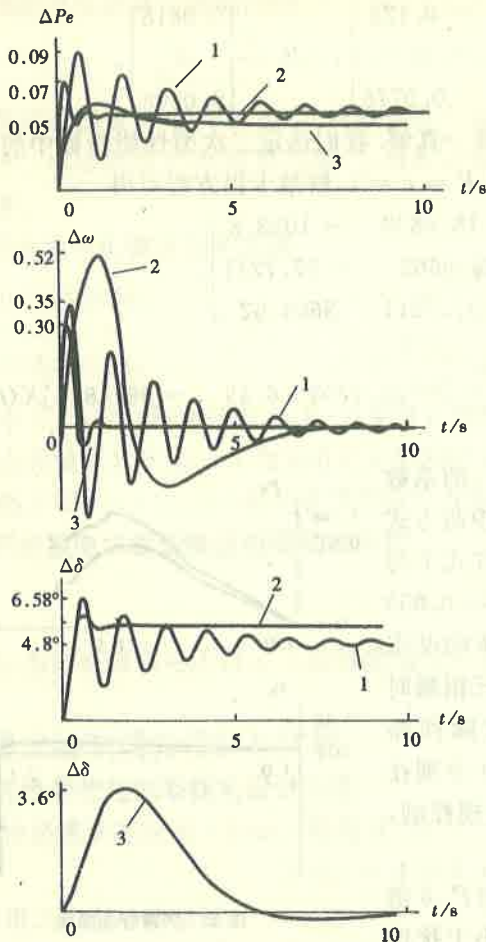


图3 小干扰下系统的动态过程

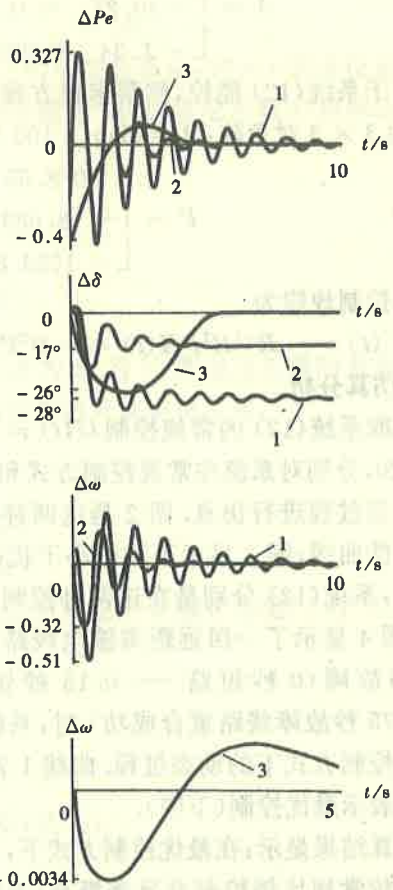


图4 大干扰下系统的特性过程

可使系统(13)化为以下的完全可控的标准形:

$$Z = AZ + BV. \quad (16)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$V = L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x) U. \quad (17)$$

运用具有二次型性能指标的线性最优控制设计方法(LQR方法)可得到系统(16)的最优控制 V^* . 由于 $r = n$ 从而 $L_g L_f^{n-1} h(x) \neq 0$, 把 V^* 代入(17)式可得系统(13)的非线性控制:

$$U = \frac{L_f^n h(x)}{L_g L_f^{n-1} h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} V^*. \quad (18)$$

如果系统的关系度 $r < n$, 或系统的输出方程不明确, 若以下两个条件成立:

1) 矩阵 $[g(x) \quad \text{ad}_f g(x) \quad \cdots \quad \text{ad}_f^{n-2} g(x) \quad \text{ad}_f^{n-1} g(x)]$, 对于在 $X = X^0$ 附近的所有 X , 其秩不变且等于 n ;

2) 向量场的集合 $D = [g(x) \quad \text{ad}_f g(x) \quad \cdots \quad \text{ad}_f^{n-3} g(x) \quad \text{ad}_f^{n-2} g(x)]$ 在 $X = X^0$ 处是

对合的。

则必存在一个函数 $\omega(x)$, 使该系统在 $X = X^0$ 处的关系度 $r = n$, 即该系统可在 $X = X^0$ 的一个开集上被精确线性化为一个完全可控的形如(16)式的线性系统。

在此, 函数 $\omega(x)$ 用以代替(15)式中的 $h(x)$ 构成坐标映射, 从而求得系统的非线性控制:

$$U = \frac{L_f^r \omega(x)}{L_g L_f^{n-1} \omega(x)} + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} \omega(x)} V^*. \quad (19)$$

根据条件 1)、2) 求解 $\omega(x)$ 并非易事, 可根据参考文献[1]提供的五步算法去求解。

3.2 励磁系统非线性控制器的设计

根据同步发电机的基本数学描述, 可以写出其状态方程:

$$\dot{X} = f(x) + g(x)U, \quad X(0) = X_0. \quad (20)$$

其中, $X = [E'_q \quad \omega \quad \delta]^T$, $X_0 = [E'_{q0} \quad \omega_0 \quad \delta_0]^T$, $U = V_f$, P_{m0} 为机械功率的初始稳态值, 而

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{E'_q}{T'_d} + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma'}} V_s \cos \delta \\ -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma'}} \sin \delta + \frac{\omega_0 P_{m0}}{H} \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix}, \quad g(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

可以验证, 系统(24)满足系统可精确线性化的条件, 故可根据参考文献[1]提供的算法, 求得坐标变换和状态反馈规律为

$$Z = \tilde{F}(x) = \begin{bmatrix} \delta - \delta_0 \\ \omega - \omega_0 \\ x_3(\omega - \omega_0) + x_4 E'_q \sin \delta + x_6 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$U(x) = V_f = -\frac{\tilde{f}_1(X)}{\tilde{g}_1(X)} + \frac{1}{\tilde{g}_1(x)} v^*. \quad (22)$$

其中 $\tilde{f}_1(X) = x_1 \sin \delta (x_1 E'_q + x_2 \cos \delta) + (\omega - \omega_0)(x_4 E'_q \cos \delta + 2x_5 \cos 2\delta) + x_3(x_3(\omega - \omega_0) + x_4 E'_q \sin \delta + x_5 \sin 2\delta + x_6)$,
 $\tilde{g}_1(X) = x_4 x_7 \sin \delta$,

$$V^* = -[K_1^* \quad K_2^* \quad K_3^*]Z = -[0.999995 \quad 2.4142 \quad 2.41421]Z,$$

$$x_1 = -\frac{1}{T'_d}, \quad x_2 = \frac{1}{T_{d0}} \frac{x'_d - x_d}{x_{d\Sigma'}} V_s, \quad x_3 = -\frac{D}{H}, \quad x_4 = -\frac{\omega_0}{H} \frac{V_s}{x_{d\Sigma'}},$$

$$x_5 = -\frac{\omega_0}{H} \frac{V_s^2}{2} \left(\frac{x'_d - x_d}{x_{d\Sigma'} x_{d\Sigma'}} \right), \quad x_6 = \frac{\omega_0}{H} P_{m0}, \quad x_7 = \frac{1}{T_{d0}}.$$

3.3 仿真及分析

由于同步发电机的驱动装置是燃气轮机, 为了更全面地研究整个燃气轮机发电系统的动态性能, 必须考虑驱动装置——燃气轮机的特性, 并将其与励磁调节系统一起进行综合分析。燃机系统原动机的模型可参见 1.1 节。该模型是用差分方程的形式给出, 仿真过程中可直接利用差分方程的递推算式逐步得出结果。

令燃机原动机差分模型的系数为: $a_1 = 1.68$, $a_2 = 0.10$, $b_1 = 0.99$, $b_2 = 4.3 \times 10^{-8}$, 然后在数字计算机上进行系统的仿真实验。首先, 要得到 θ_i 产生 0.01 的阶跃增量时 N_g 的动态过程, 然后利用 N_g 的动态数据可对三种控制方式分别进行仿真。实验结果如图 5 所示。

系统(20)在输入(22)的作用下, 若忽略阻尼转矩 $-\frac{D}{H}\omega$, 且机械功率 P_m 保持 $P_{m0} = P_{e0}$ 不

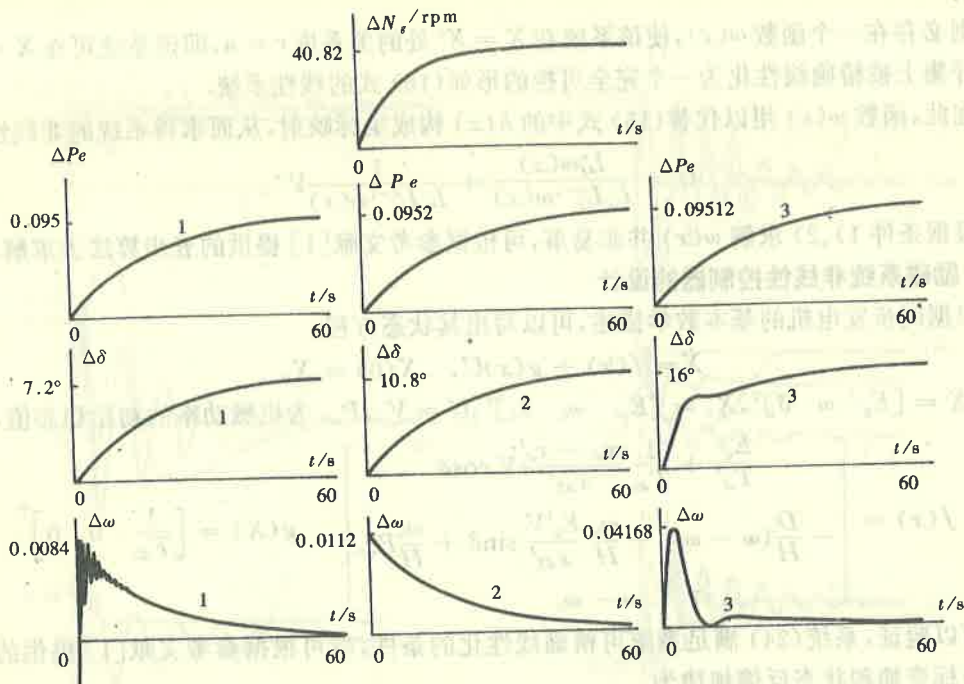


图5 考虑了原动机特性后系统的动态特性

变,则该系统等价于一个完全可控的线性系统:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\delta} &= \Delta \omega, \quad \Delta \dot{\omega} = -\frac{\omega_0}{H} \Delta P_e, \\ \Delta \dot{P}_e &= \frac{H}{\omega_0} (k_1^* \Delta \delta + k_2^* \Delta \omega + k_3^* \Delta \dot{\omega}).\end{aligned}$$

在上式中消去 $\Delta \omega$ 后进行拉氏变换可得:

$$\Delta P_e(s) = \frac{k_1^* H}{k_3^*} \frac{1 + k_2^* s}{1 + \frac{1}{k_3^*} s} \Delta \delta(s).$$

由拉氏变换终值定理可知, P_e - δ 曲线是定义在 δ 角的开区间 $(0, \pi)$ 上的一条直线,即理论上讲,在非线性能励磁控制下,发电机电势 E_q 与无穷大母线电压 V_∞ 之间的夹角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间,系统是小干扰稳定的. 仿真结果中的功角特性曲线图2可以证实这一点. 曲线3表示非线性控制(下同). 图3显示了系统非线性控制下,微小干扰 ($\Delta P_m = 0.05$) 作用后的动态过程,图4则显示了在一回远距离输电线路发生三相瞬时性短路故障(0秒短路——0.15秒切除故障回路——0.75秒故障线路重合成功)时,系统非线性控制下的动态过程. 由仿真曲线可见,在小干扰作用下,非线性控制提供的阻尼效果基本上控制了系统的振荡.

改变工作点为: $P_e = 0.5$, $\delta = 1.5$, 重复以上仿真过程. 仿真结果图6显示:在常规比例,最优及非线性控制下,

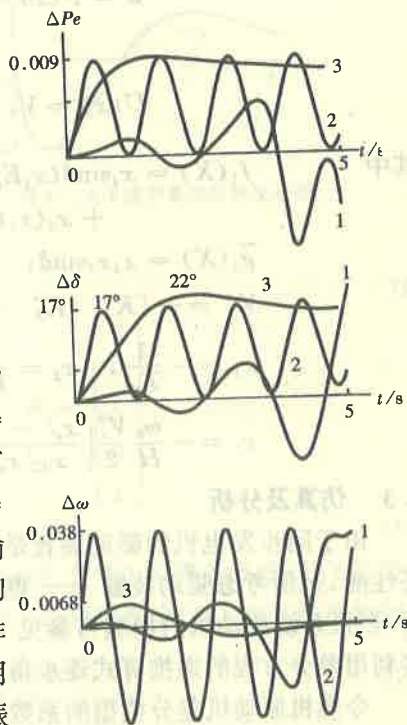


图6 改变工作点后系统在小干扰下的动态过程

系统在此工作点分别是不稳定、临界振荡和稳定的。

4 结 论

在仿真实验中,我们特别考虑了燃气轮机原动机特性的影响。通过仿真分析和实验比较,我们可以得出以下结论:

- 1) 在提高系统抗小干扰能力方面,非线性控制器的效果远远好于最优和常规控制器。
 - 2) 在提高系统抗大干扰能力方面,最优控制器抑制振荡的能力强于常规比例控制器,而非线性控制器抑制振荡的能力又强于最优控制器。
 - 3) 在整个燃机系统动态响应过程中,最优控制器与非线性控制器都较常规比例控制器提供了较好的阻尼,而最优控制器与非线性控制器的动态响应十分接近。
- 综上所述,从控制效果而言,非线性控制器是最佳的。

参 考 文 献

- 1 卢强,孙元章著. 电力系统非线性控制. 北京:科学出版社,1993,20—144
- 2 Hung, W. W.. Dynamic simulation of gas-turbine generating unit. Proc. IEE, 1991, 138:342—350
- 3 卢强,王仲鸿,韩英铎著. 输电系统最优控制. 北京:科学出版社,1982,100—200
- 4 Tiwari, R. N., Purkayastha, M. E. and Tiwari, S. N.. Synthesis of stable and optimal controllers for a 2-shaft gas turbine. Proc. IEE, 1977, 124:1243—1248
- 5 伍力. 燃气轮机同步发电机励磁系统控制方式的研究. 华南理工大学硕士研究生论文集,广州,1996

Optimal and Nonlinear Control for Excitation System of Gas-Turbine Generators

WU Jie, YANG Ping and WU Li

(Department of Electric Power, South China University of Technology • Guangzhou, 510641, PRC)

Abstract: Up till now, the development of gas-turbine generators is greatly but the associated control system improvement has been made a little. It is necessary that modern control theories should be used in gas-turbine generators. We raise two control tactics for excitation system. Firstly, we use optimal control Theory to constitute optimal excitation controller. Secondly, we use nonlinear control theory to constitute nonlinear excitation controller. After the simulation comparison among the conventional controller, optimal controller and nonlinear controller, especially thinking about the character of gas-turbine, we choose and raise the scheme of the nonlinear excitation controller.

Key words: gas-turbine generator; excitation system; optimal control; nonlinear control

本文作者简介

吴捷 见本刊1997年第3期第369页。

杨苹 1967年生。1988年毕业于华南理工大学无线电工程系,1994年获本校控制理论与应用硕士学位。现为华南理工大学电力学院自动控制专业博士生。主要从事自适应控制理论与应用的研究。

伍力 1970年生。1996年毕业于华南理工大学,获控制理论与应用硕士学位。目前主要从事电力系统自动化的研究。